

Rec'd PCT/PTO 10 DEC 2004

PCT/JP03/07433

日本国特許庁

JAPAN PATENT OFFICE

04.07.03

#3

10/516306

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2003年 3月 3日

出願番号

Application Number:

特願2003-055645

[ST.10/C]:

[JP2003-055645]

出願人

Applicant(s):

古河電気工業株式会社

REC'D 25 JUL 2003

WIPO

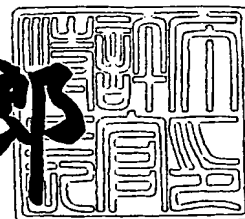
PCT

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2003年 6月17日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎



BEST AVAILABLE COPY

出証番号 出証特2003-3047137

【書類名】 特許願

【整理番号】 A20741

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G02F 1/00
G02F 1/35

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 五十嵐 浩司

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 松下 俊一

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 並木 周

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 高坂 繁弘

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 井上 崇

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 古河電気工業株式会社内

【氏名】 飛岡 秀明

【特許出願人】

【識別番号】 000005290
 【氏名又は名称】 古河電気工業株式会社
 【代表者】 古河 潤之助
 【電話番号】 045-311-1220

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2002-170429
 【出願日】 平成14年 6月11日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 005267
 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 伝送される信号光に再生処理を施す波長分割多重光再生システムであって、

互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光を前記波長毎に分波する分波装置と、

分波された前記複数の信号光のうち少なくとも一つの信号光の偏光状態を所望の偏光状態に偏光変換する偏波コンバータと、

偏光変換された前記信号光に前記再生処理を施す再生装置とを具備したことを特徴とする波長分割多重光再生システム。

【請求項 2】 前記再生装置の出射側に、再生処理が施された前記信号光を他の複数の信号光と合波して波長分割多重光とする合波装置を含む請求項 1 の波長分割多重光再生システム。

【請求項 3】 前記再生装置は、増幅装置、波形再生装置、クロック再生装置及び雑音除去装置よりなる群のうちいずれか一つを含む請求項 1 または請求項 2 のいずれかの波長分割多重光再生システム。

【請求項 4】 請求項 1 から請求項 3 に記載された波長分割多重光再生システムを複数備え、これらのシステム間が前記光スイッチを介して接続されている波長分割多重光再生システム。

【請求項 5】 信号光に再生処理を施す波長分割多重光再生方法であって、

互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光を前記波長毎に分波する分波工程と、

分波された前記複数の信号光のうち少なくとも一つの信号光の偏光状態を偏光変換する偏光変換工程と、

前記偏光変換された信号光に前記非線形光学効果を利用した再生処理を施す再生工程とを備えたことを特徴とする波長分割多重光再生方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

通信システムの伝送容量は増加の一途をたどっており、光ファイバーを用いた光通信システムにより伝送容量は著しく増加している。例えば、通信システムは、ポイント・トゥー・ポイントの幹線系と、メトロ系及びアクセス系とに分けられるが、前者の幹線系では既に光通信システムが普及し、後者においても電気通信システムから光通信システムへの移行が進められている。すなわち、通信システム全体が光通信システムによって構築されようとしている。

【0003】

近年、波長分割多重方式により、1本の光ファイバーで伝送可能な情報量が飛躍的に増加した。同方式では、光ファイバーの低損失帯域をスペクトル変換効率0.4bit/Hzで利用すると、1本の光ファイバーで伝送可能な伝送容量は約3.2Tbit/sとなる。具体的には、この伝送容量は、各チャンネル（波長）の信号光の伝送速度が現在利用されている10Gbit/sであるとした場合、320のチャンネルによって実現される。

【0004】

ところで、信号光は、長距離を伝搬する際、必ず、その信号波形、タイミング、及び強度が劣化する。そして、ある程度の距離を伝播した信号光は必ず再生処理を行なう必要がある。そのため、光通信システムには、通常、劣化した信号光を再生するための光信号再生システムが組み込まれている。この光信号再生システムは、例えば、劣化した信号光を受信してそれを電気信号に変える受信装置と、この電気信号に対して増幅、雑音除去、波形再生、クロック再生等の所望の再生処理を行なう再生装置と、そして再生処理を受けた電気信号を再び信号光に変換してそれを光伝送路へ送信する送信装置とを備えている。

【0005】

具体的には、上記したチャンネル数が320にまでおよぶ複数の信号光が伝播

する光ファイバに介挿される光信号再生システムの場合には、このチャンネル数に対応して、320台の光受信装置、再生装置、及び送信装置が組み込まれる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

このように多数の装置を含む光信号再生システムは、小型化が困難であり、また、消費電力が大きいという問題がある。

更には、上述したように光通信システムがメトロ系及びアクセス系に使用された場合、320チャンネルの光信号再生システムを各中継所に多数設置する必要が生じるため、光通信システム全体が大型化し、コストの増加や消費電力の増加を招く。

【0007】

このような問題を解決する一つの方法としては、波長分割多重方式におけるチャンネル数を削減し、各チャンネルの伝送速度を上昇させる方法があげられる。同一の伝送容量を達成する場合には、各チャンネルの伝送速度と、波長分割多重チャンネル数とは反比例の関係にあるからである。

【0008】

しかし、上記した光信号再生システムに用いられている再生装置は、電気信号に対して処理を行なう電気デバイスであって、物理的に応答速度の上限をもつ。例えば、電気デバイスで処理可能な信号の伝送速度の限界は、現在40Gbit/sであり、この伝送速度では、なお約80ものチャンネル数が必要である。更には、電気デバイスをそのように高速駆動させるためには高い電力が必要となる。したがって、電気デバイスを用いた光信号再生システムにおいては、各チャンネルの伝送速度には上限があり、現実には、その小型化及び消費電力の低減は困難である。

【0009】

このような電気デバイスを用いた光信号再生システムにおける問題を解決する方法の一つに、信号光を電気信号へと変換することなく、光の状態のまま信号再生処理を行なう全光信号再生方法がある。この全光信号再生方法を用いた装置は、通常、高速の電気変調器と物質の非線形光学効果を利用した再生装置とからな

る。

【0010】

しかしながら、この全光信号再生装置は、電気変調器を用いるため、光電変換を行なう光信号再生システムと同様にその処理速度に上限がある。さらに40Gbit/s以上の伝送速度の信号光を再生処理する場合、時間分割することで伝送信号光の伝送速度を落とし、信号再生を行なった後、時間分割多重する必要があるため、大規模な装置になる。

【0011】

また、上記した全光信号再生装置は、光信号の再生に非線形光学応答（非線形光学効果）を利用しているが、その場合には、以下の問題も発生する。

すなわち、大容量光通信システムにおいて、互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光が光伝送路を伝搬した場合、伝搬後の波長分割多重光に含まれる各信号光の偏光状態は波長毎にわずかに異なる。このような状態にある波長分割多重光に対して、一括して、非線形光学効果を利用した全光信号再生装置による再生処理を施した場合、入射光の偏光状態に応じて非線形光学効果の大小が大きく変化するため、再生された波長分割多重光には、良好に再生されない、もしくは全く再生されない信号光が含まれてしまうという問題である。

【0012】

以上では光再生装置の入力伝送光偏波状態に注目して、その問題点を示した。以下では、光再生システムに注目して、その現状とその問題点を示す。光再生とは伝送によって劣化した光信号の強度、波形整形そしてタイミングを再生する機能（re-amplification、re-shapingとre-timing、以下ではO3Rと略す）を意味する。この機能を有する光再生システムでは、無限遠（長距離）の光ファイバ伝送が可能となりえる。

【0013】

上述した無限遠（長距離）伝送に関してはLeutholdらにより報告されている（Leuthold et al., Electron. Lett., 38, p.890, 2002）。この報告では、O3R再生器を用いる40Gb/s 1,000,000 km伝送について記述されている。

【0014】

Leutholdらは、本報告において、時間再生に必要な光クロック抽出（伝送信号光に同期するクロックパルス列の発生技術）及びスイッチングにおいて電子回路技術を用いている。このため、この装置では電子回路技術では対応不可能な伝送スピードには対応できない。例えば160Gb/sシステムのような電子回路制限以上の伝送スピードを有するシステムには適用不可能である。

【0015】

なお、160 Gb/sシステムに関しては、光スイッチを用いる光再生システムが報告されている（Schubert et al., Electron. Lett., 38, p.903, 2002）。しかしながら、このシステムでは、クロック抽出装置を有していない為にO3R装置として機能出来ないと考えられる。

【0016】

上述をまとめると、有効な全光技術を基本とするO3Rは、実現されていないのが現状である。しかしながら、O3Rの各コンポーネントとなる波形整形技術及び時間再生技術単体に関しては多数の報告がある。以下にこれらの報告を示す。ただし、ここでは本発明に関連する光ファイバを基本とする技術に絞っている。

【0017】

はじめに、全光波形整形技術について説明する。この技術手法は2つの方式に大別される。一つ目は、光ファイバの光非線形性と異常分散性の複合的効果の結果として形成されるソリトンを活用する手法である（Hasegawa and Tappert, Appl. Phys. Lett., 23, p.142, 1973）。この手法に基づく波形整形器は、soliton converterと呼ばれる。もう一つは、光ファイバ非線形性を介した光パルスの自己位相変調効果に基づく手法である（Mamyshev, ECOC'98, p.475, 1998）。これは提案者の名前に由来しMamyshevフィルタと称されている。スーパーコンティニウム光を活用する方法はこれの追究型と位置づけられる。

【0018】

前者（soliton converter）を用いたシステム実験としては、4×40Gb/s信号の10,000 km伝送が報告されている（Dany et al., Opt. Lett., 25, p.793, 2000）。後者（Mamyshevフィルタ）は前述したLeutholdらの1,000,000 km伝送路に活用されている（Leuthold et al., Electron. Lett., 38, p.890, 2002）。これら

はいずれもシステムの観点からの報告であり、それらデバイス単体としての性能は明確に記述されていない（数少ない報告例がDany et al., ECOC'01, We.P.45, 2001である）。特に、soliton converterでは、ソリトン効果を介する雑音増大も問題となる（Kubota et al., J. Opt. Soc. Am. B, 16, p.2223, 1999）為、デバイス性能の観点からの設計も重要となる。つまり、これらのデバイス性能を明らかにし、デバイス単体の最適設計指針を得ることが今後の課題となる。

【0019】

次に時間再生技術について説明する。この技術の主流は光クロック抽出と光スイッチ技術の複合法である。この構成を図38に示す。光クロック抽出部と光スイッチ部から構成される。前者（光クロック抽出部）は、入力信号（伝送信号に相当する光信号もしくは電気信号）と局所光（クロック基準となり得る光パルス列、光local oscillator（光LO）とも称される）の位相を一致させるものである。言い換えると、光クロック抽出は、入力光と局所光との間の同期を取ることによって実現される。その為、光LOには繰返し周波数可変性が必要である。

【0020】

後者（光スイッチ部）は、光領域での乗算機能を実現する光ファイバにおける非線形効果を活用する光デバイス、例えば四光波混合（four wave mixing: FWM）デバイスや非線形光ループミラー（nonlinear optical loop mirror: NOLM）、を利用した光スイッチである。以下に、光クロック抽出及び光スイッチ技術の詳細について述べる。

【0021】

図38において破線で囲まれている部分が光クロック抽出部であり、これは光位相比較部、光LO発生部とコントローラ回路から成る。光位相比較器において外部信号光と光LOの位相差を検出し、その誤差が小さくなるように光LOの発振周波数（パルス列の繰返し周波数に対応）を調整する。

【0022】

この結果、外部信号光と光LOの同期が実現され、外部信号と同期の取れた時間位置が正確なパルス列（今後はクロックパルス列と呼ぶ）が出力として得られる。両者の位相を比較する部分に、電子回路技術ではなく、光ファイバの非線形効果

を活用することによって160 GHzを超える高速動作可能な位相比較器が実現される。以上のような光領域における位相比較器を用いる同期法はoptical phase locked loop (OPLL) と称される。実際に、NOLMを用いて2台のLDからのビート光と外部信号光の同期をとることによるクロック抽出が提案されている (Bigo et al., US6,239,893 B1)。

【0023】

ここで注目すべき内容は、このOPLLの出力光クロック列のタイミングジッタ（クロックパルスの時間揺らぎ）である。タイミングジッタとは、クロックパルスの時間位置のズレ量を意味する。このジッタは伝送システムの性能劣化の要因となり得る為に、この抑圧は重要である。クロックパルス列のタイミングジッタはOPLL動作速度と相関があり、OPLL動作が高速であるほどジッタは減少する。即ち、OPLL高速化がジッタ低減化に効果的である。

【0024】

しかしながら、上記技術 (Bigo et al., US6,239,893 B1) のようにNOLMを用いるとOPLLループが長尺となる為にOPLL動作帯域が制限されてしまう。その結果、ジッタ低減が困難となる。これを解決する為には、位相比較器に用いる光非線形デバイスのファイバ短尺化が重要となろう。ファイバを短尺化することにより、OPLL動作帯域が制限されず、言い換えるにOPLLの高速動作が実現され、低ジッタな高品質クロックパルス列発生が可能となる。

【0025】

上述クロック抽出技術と共に時間再生技術に必要なのが光スイッチ技術である。ここでは、光ファイバの非線形効果を活用した光スイッチの典型例であるFWMを活用する手法について説明する。光ファイバに波長が異なる2色の光波を入力すると、それら入力光の何れかが非線形効果に十分な光パワーを有する場合においては、それらとは色の異なる新たな光波が発生する。これがFWM現象である。

【0026】

クロックパルス列と信号光が光ファイバに入力された場合、そのFWM発生光には入力信号光の情報が重畳されているだけでなく、そのパルスタイミングはクロックパルス列によって決定される。従って、情報が乗った低ジッタの光信号パルス

列が得られる。これがFWMを基本とする時間再生の原理である。ただし、光ファイバ伝搬する光パルスには非線形効果だけではなく分散効果も影響を与える。

【0027】

この効果或いはこれら効果の複合により、パルス伝搬においてパルス波形が変化する。その結果、FWM光の波形歪が生じる。これを抑圧する為には、ファイバ分散値や入力パワーの最適化を行うことが有効であるが、具体的な数値やその制御方法等は明らかにされていない。

【0028】

以上、光再生システムに必要最低限のコンポーネントに関して記述した。この他に光再生システムの性能を向上させる技術も重要である。ここでは本発明に関連する以下の二つのコンポーネントについてまとめる。(1)光パルス波形を光スイッチに適した波形に変換する装置、(2)光パルス成分と光雑音成分を分離する装置。

【0029】

はじめに、上述した(1)光パルス波形を光スイッチに適した波形に変換する装置に関連する、光スイッチにおける強度雑音増大の抑圧に有効なパルス矩形化技術をもとめる。一般に、光スイッチでは光非線形性と分散の相互作用の結果として、入力される伝送信号パルスの時間揺らぎ（位相揺らぎ）が時間再生された出力信号光の強度揺らぎに変換される。これを説明するのが図39(a)である。

【0030】

ここでは、ジッタを有するパルス列とクロックパルス列の光スイッチを考える。光スイッチ出力パルスパワーは伝送パルスとクロックパルスの時間重なりに関連がある。その為、ジッタによる両者パルス重なりの変化が光スイッチ出力パルスパワー揺らぎに変換される。この位相揺らぎから光強度揺らぎへの変換を抑制する為には、伝送信号光パルスあるいは抽出したクロックパルスの矩形化変換が有効である（図39(b））。

【0031】

この矩形化方法としては、波長分散や偏波分散を活用する方法と、非線形効果と正常分散の複合的効果を活用する方法に大別される。前者の例はファイバブラッ

グレーティングや偏波保持ファイバを用いた手法 (Lee et al., OFC2001, PD30-1, 2001およびSchubert et al., Electron. Lett., 38, p.903, 2002) であり、後者の例は正常分散ファイバを用いる方式 (原理の報告はNakatsuka et al., Phys. Rev. Lett., 47, p.910, 1981) である。

【0032】

前者の線形動作を基本とする方式では、変換される矩形化の立下り・立上りの急峻さは入力パルス幅によって決定される。即ち、急峻な矩形化パルスを得る為には、それに対応する超短光パルスの入力が必要となる。それに比べて、後者は急峻な矩形波への波形変換が可能である利点を有しているが、矩形化に必要な非線形効果と分散効果を得る為には、入力光の高パワー化やファイバ長尺化が必須となる。

【0033】

次に、上述した(2)光パルス成分と光雑音成分を分離する装置について説明する。ここでは、雑音除去コンポーネントについてまとめる。光パルスには雑音が付加されている。この雑音の主な成分は、光増幅に伴い発生する自然放出光 (amplified spontaneous emission light: ASE) である。一般に、雑音は信号光よりも広帯域な光スペクトルを有している為、信号光帯域外の雑音成分は光フィルタによってある程度除去することができる。

【0034】

しかしながら、信号光帯域内の雑音成分は残留する。この雑音を除去する為には、前述の波形整形を行う他に光ソリトンの性質を活用する方法がある。ここでは本発明に関連した後者に注目する。

【0035】

光ソリトン伝搬では、誘導ラマン散乱 (stimulated Raman scattering: SRS) によってソリトンが長波長側にシフトする現象 (soliton self-frequency shift: SSFS) が報告されている (Mitschke and Mollenauer, Opt. Lett., 11, p.659, 1986)。この現象は、ソリトンに雑音が付加されていても生じ得る。この性質を活用するノイズ除去法としては、ソリトン自己周波数をシフトする方法が提案されている (並木ら、特開2001-109024号)。その雑音除去装置の構成を図40(a)

に示す。

【0036】

これは異常分散ファイバ (anomalous-dispersion fiber: ADF) と光フィルタから成る。図40(b)上部に示すような雑音成分を有する光ソリトンがADFに入力される。そこでの伝搬では、光ソリトン成分がSRSによってSSFSする。ここで注目すべきは、このSRSによってソリトン成分は長波長側にシフトするが、雑音成分は長波長側に波長シフトしない点である。従って、シフト後のソリトン成分のみを出力光フィルタによって抽出することによって信号光帯域内であった雑音成分をも除去することが可能となる(図40(b)下部)。

【0037】

更に、この現象では波長シフトも伴う為に、SSFSの制御によって信号光を所望の波長に調整することも可能である。しかしながら、一般にSSFSはフェムト秒領域において生じる現象である為に、ピコ秒ソリトン伝搬におけるSSFSやその効率化の為には更なる工夫が必要である。

【0038】

以上、光再生システムにおける現状とその問題を記述した。本発明はこれら問題点を解決し、かつ簡素なO3Rシステムを提供することを目的とする。

【0039】

また、本発明は上記した問題を解決し、大伝送容量、小型化及び省電力化が実現可能であり、かつ、波長分割多重光における全ての信号光を再生することができる波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法の提供を目的とする。

【0040】

【課題を解決するための手段】

上記した目的を達成するために、本発明においては、信号光に再生処理を施す波長分割多重光再生システムであって、互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光を前記波長毎に分波する分波装置と、分波された前記複数の信号光のうち少なくとも一つの信号光の偏光状態を所望の偏光状態に偏光変換する偏波コンバータと、偏光変換された前記信号光に前記再生処理を施す再生装置とを

具備したことを特徴とする波長分割多重光再生システムが提供される（請求項1）。

【0041】

好ましくは、前記再生装置の出射側に、再生処理が施された前記信号光を他の複数の信号光と合波して波長分割多重光とする合波装置を含む（請求項2）。

【0042】

好ましくは、前記再生装置は、増幅装置、波形再生装置、クロック再生装置及び雑音除去装置よりなる群のうちいずれか一つを含む（請求項3）

【0043】

好ましくは、請求項1乃至請求項3いずれかの波長分割多重光再生システムを複数備え、これらのシステム間が前記光スイッチを介して接続されている（請求項4）。

【0044】

更に、本発明においては、信号光に再生処理を施す波長分割多重光再生方法であって、互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光を前記波長毎に分波する分波工程と、分波された前記複数の信号光のうち少なくとも一つの信号光の偏光状態を偏光変換する偏光変換工程と、前記偏光変換された信号光に再生処理を施す再生工程とを備えたことを特徴とする波長分割多重光再生方法が提供される（請求項5）。

【0045】

【発明の実施の形態】

本発明では、劣化した信号光を含む波長分割多重光は、後述するように非線形光学効果を利用して再生される。そこで、まず、非線形光学効果について説明する。

【0046】

非線形光学効果は、非線形光学定数が高い媒質（以下、非線形光学媒質ともいう）に強度の大きな光が入射したときに顕著に発生する。詳しくは、非線形光学定数が高い媒質としては、例えば、希土類元素をドープした光ファイバ（以下、高非線形ファイバともいう）、 LiNbO_3 等の強誘電体、及び半導体等があげら

れる。また強度の大きな光としては、信号光自体、又は、信号光とは別にこの効果を発生させるために用意された一つ若しくは二つ以上の制御光若しくは励起光があげられる。

【0047】

非線形光学効果が生じた場合、例えば、この媒質に入射している信号光の波形形状の変化若しくはその位相の変調が生じる。また、制御光若しくは励起光と周波数の異なる高調波又は差周波若しくは和周波が発生する。このような非線形光学効果としては、自己位相変調（以下、SPMという）、相互位相変調（以下、XPMという）若しくは四光波混合（以下、FWMという）、ラマン増幅、パラメトリック増幅、ソリトン効果及びスーパーコンティニューム効果（以下、SCという）等が挙げられる。

【0048】

ここで、非線形光学効果の大きさ、例えば、周波数変調の程度や発生した高調波の強度は、入射した光の強度に対して非線形である。

そして、非線形光学効果の大きさは、偏波依存性を有する。例えば、強度の大きな光が無偏光ではなく、ある偏光状態を有し、かつ、この強度の大きな光の入射方向と直交する面内において非線形光学媒質が異方性を有する場合を考える。この場合、非線形光学効果の大きさは、この光の偏光状態と媒質の相対方位に依存するという偏波依存性を有する。また、媒質にこのような異方性がない場合であっても、非線形光学効果の大きさは、強度の大きな光が制御光若しくは励起光であるときには、信号光の偏光状態と、制御光若しくは励起光の偏光状態との相対関係に強く依存する。

【0049】

以下、図面に基づき本発明の実施形態を説明する。

図1は、本発明に係る第1実施形態の波長分割多重光再生システム1（以下、再生システム1という）を示している。

【0050】

再生システム1は、波長分割多重通信システムに組み込まれた状態、例えばこの通信システムの一部を構成する光ファイバ4と光ファイバ6との間に介挿され

た状態で使用される。

【0051】

そして、再生システム1は、波長分割多重光に含まれている信号光であって、波長分割多重光が波長分割多重通信システム中を伝搬することによって劣化した信号光を、伝搬する以前の状態、例えば発信器から出射した直後の状態へと復元もしくは再生する。なお、信号光の劣化とは、例えば、信号光の強度、位相、周波数、偏光状態またはこれらのうち複数が所定の許容範囲を超えて変化することをいう。

【0052】

再生システム1は分波装置8と合波装置10とを備えている。

分波装置8は、一つの入射ポート8aと複数の出射ポートとを有し、この入射ポート8aには光ファイバ4が接続されている。光ファイバ4から入射ポート8aを介して分波装置8に入射した波長分割多重光は、複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots 、 λ_n へと分波される。そして各信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots 、 λ_n は、それぞれ、波長毎に異なる分波装置8の出射ポートから出射する。

【0053】

一方、合波装置10は、複数の入射ポートと一つの出射ポート10aとを有し、この出射ポート10aには光ファイバ6が接続されている。各入射ポートを介して合波装置10に入射した信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots 、 λ_n は、合波されて波長分割多重光となり、出射ポート10aを介して光ファイバ6へと伝搬する。

【0054】

なお、これら分波装置8及び合波装置10は共に、例えばアレイ導波路回折格子、フィルター型合分波器、FBG (Fiber Bragg Grating) 型合分波器により構成することができる。

【0055】

分波装置8と合波装置10との間には、複数の光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 、 12_n が延びており、各光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 \dots 、 12_n の両端は、分波装置8の出射ポートと合波装置10の入射ポートに接続されている。

【0056】

これら光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 $\dots 12_n$ のうち少なくとも一つの光路 12_1 には、分波装置 8 側から順に、偏波コンバータ 13 と、光信号再生装置 15（以下、再生装置 15 と記述する）とが介挿されている。

【0057】

再生システム 1 においては、光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 $\dots 12_n$ のうち、どの光路に上記した偏波コンバータ 13 及び再生装置 15 を介挿するかという点については、各光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 $\dots 12_n$ を伝搬する信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 $\dots \lambda_n$ の劣化の程度に応じて適宜決定することができる。

【0058】

各光路 12_1 、 12_2 、 12_3 、 $\dots 12_n$ は、例えば、シングルモードファイバー若しくは分散シフトファイバ等の光ファイバ、光導波路、空間、又はこれらの組み合わせにより構成することができる。しかしながら、光路 12_1 のうち、偏波コンバータ 13 と再生装置 15 との間を延びる部分については、後述する理由により、そこを伝播する光の偏光状態を保持することが可能な偏波保持型導波路 $12a$ で構成することが好ましい。このような偏波保持型導波路 $12a$ としては、例えば、偏波保持光ファイバ、半導体光導波路、及びガラス製平面形導波路などをあげることができる。

【0059】

偏波コンバータ 13 へ入射した信号光 λ_1 は、この偏波コンバータ 13 において、その偏光状態が後述する再生装置 15 による再生処理に適した所望の偏光状態、例えば直線偏光へと偏光変換された後、偏波コンバータ 13 から出射する。

【0060】

ところで、偏波コンバータ 13 に入射する時点において、信号光 λ_1 は、自らの波長、または、発信器で生成されてから偏波コンバータ 13 に入射するまでの伝搬光路の長さ、種類もしくは状態等に対応したある偏光状態を有している。すなわち、信号光 λ_1 は、光路の波長分散、偏波モード分散（光弾性効果によるものも含む）等に応じた偏光状態を有している。

【0061】

偏波コンバータ 13 は、このように様々かつ不確定な要因に基づきあらゆる偏

光状態を取り得る信号光 λ_1 に対して偏光変換を施し、その偏光状態を所望の偏光状態へと変換する。すなわち、偏波コンバータ13は、そこに入射した時点における信号光の偏光状態に依存することなく、所望の偏光状態の光を出射させるものであって、任意の偏光状態を所望の偏光状態へと偏光変換する機能を有している。

【0062】

偏波コンバータ13から出射された信号光 λ_1 は、偏波保持型導波路12aを伝搬して再生装置15へ入射される。

ここにおいて、偏波保持型導波路12aを伝搬する信号光は、その偏光状態を維持したまま伝搬することができる。よって、偏波コンバータ13を出射した信号光 λ_1 は、その偏光状態を維持したまま再生装置15へと入射することができる。

【0063】

より具体的に説明すると、偏光変換後の信号光 λ_1 が直線偏光であり、また、偏波保持型導波路12aとして偏波保持光ファイバを用いた場合には、信号光の偏光面と偏波保持光ファイバの主軸、すなわち進相軸若しくは遅相軸とを一致させることにより、偏波コンバータ13と再生装置15との間で、信号光 λ_1 の偏光状態は保存される。

【0064】

なお、偏波保持型導波路12aを使用しない場合には、偏波コンバータ13と再生装置15との間の光路12₁の長さを短くすることによっても、それらの間で信号光 λ_1 の偏光状態の保存もしくはその変化を抑制することができる。

【0065】

また、偏波コンバータ13と再生装置15との間の光路12₁が偏波保持型導波路12aではない場合であっても、この光路12₁の複屈折が既知であれば、その複屈折を考慮して偏波コンバータ13の偏光変換の設定を行なうことにより、所望の偏光状態の信号光 λ_1 を再生装置15へ入射させることができる。

【0066】

再生装置15は、入射した信号光 λ_1 に非線形光学効果を利用した再生処理を

施して信号光 λ_1 を再生する。

【0067】

再生装置15から出射し、光路12₁を伝搬した信号光 λ_1 は、合波装置10へとその入射ポートを介して入射する。一方、合波装置10には、その他の光路12₂、12₃、…12_nを伝搬してきた信号光 λ_2 、 λ_3 、… λ_n もそれぞれ互いに異なる入射ポートを介して入射している。合波装置10は、信号光 λ_1 を含むこれらの信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n を合波して波長分割多重光とし、出射ポート10aから出射させる。

【0068】

以下では、上記した再生システム1を用いた、波長分割多重光再生方法A（以下、方法Aという）を、図1を用いて説明する。

【0069】

方法Aは、分波工程と、偏光変換工程と、再生工程とを備える。

まず、分波工程において、分波装置8が波長分割多重光を波長毎に複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n に分波する。

【0070】

その後、偏光変換工程において偏波コンバータ13が、分波工程で得られた複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n のうち、少なくとも1つの信号光 λ_1 に偏光変換を施す。この偏光変換は、信号光 λ_1 の偏光状態を、再生装置15において所望の非線形光学効果の発現に適合した偏光状態、若しくは、再生装置15において信号光がもっともよく再生される偏光状態へと偏光変換する。

【0071】

そして、再生工程において再生装置15が、偏光変換工程で偏光変換された信号光 λ_1 に対して非線形光学効果を利用した再生処理を施す。

これらの再生システム1及び方法Aは、以下の作用を有する。

波長分割多重光に含まれる互いに波長の異なる複数の信号光は、波長分割多重光が例えば通信システム中の発信器から出射してこの通信システム中を伝搬した後では、それらの偏光状態は波長に応じて互いに異なっている。そのため、波長の異なる複数の信号光を、非線形光学効果を利用した再生装置にて一括して再生

した場合、その波長毎に、信号光の再生の程度が異なってしまう。すなわち、ある一つの波長の信号光は良好に再生できたが、他の波長の信号光は再生されなかったという場合が起こり得る。

【0072】

そこで、再生システム1及び方法Aにあっては、信号光の偏光状態が波長依存性を有していること、ならびに、非線形光学効果を利用した信号光の再生の程度は、信号光の偏光状態と、制御光若しくは励起光の偏光状態との相対関係に強く依存することを考慮する必要がある。このため、まず、波長分割多重光を波長毎に複数の信号光へと分波して、それぞれの信号光を独立化して扱う。そしてその上で、再生装置15による再生処理が必要な信号光の偏光状態を、信号光の再生装置15への入射に先立って再生に適合する偏光状態に調整する。

【0073】

これにより、再生システム1及び方法Aは、再生処理が必要な信号光を、発信器から出射した直後の状態、もしくは劣化前の信号光の状態へと忠実に再現することができる。その結果、再生された信号光を含む波長分割多重光の波形を良好に再生することができる。

【0074】

更に、再生システム1及び方法Aにおいては、信号光は電気信号に変換されることなく再生されるので、伝送容量が電気デバイス等によって制限されることがない。そのため、再生システム1及び方法Aによれば、各波長（チャンネル）の信号光の伝送速度を40Gbit/sを超えて高めることが可能であり、波長分割多重光のチャンネル数を減らすことができる。その結果、再生システム1は、従来に比べて少ない再生装置15で構成されるので、その小型化及び省電力化が可能である。

【0075】

以下では、再生装置15について詳述する。

再生装置15は、図2に示したように、増幅装置17、波形再生装置19、クロック再生装置21及び雑音除去装置23を含む。

【0076】

再生装置 15 は、再生システム 1 に求められる再生能力に応じて、光増幅装置 17、波形再生装置 19、クロック再生装置 21 及び雑音除去装置 23 よりなる群のうちから選択された一つ又は二つ以上を含む。また、その選択された装置は、非線形光学効果を利用して再生処理を行なうものである。また、これら増幅装置 17、波形再生装置 19、クロック再生装置 21 及び雑音除去装置 23 の配列は、限定されることはなく、必要に応じて適宜変更することが可能である。例えば、波形再生装置 19 の前段にクロック再生装置 21 を配置してもよい。

【0077】

ここで、増幅装置 17 は減衰した信号光を増幅し、波形再生装置 19 は信号光の波形を再生し、クロック再生装置 21 は信号光のクロック再生を行ない、そして、雑音除去装置 23 は信号光に含まれる雑音を除去する。

【0078】

なお、増幅装置 17 により増幅され、雑音として自然放出光（無偏光）を含む信号光であっても、偏光子を透過させることにより、信号光に含まれる雑音を半減させることができる。すなわち、増幅装置 17 と偏光子とを組み合わせたものは、雑音除去装置 23 として用いることができる。

【0079】

増幅装置 17 としては、例えば、エルビウム添加ファイバ型増幅器、ラマン増幅器、半導体光増幅器、パラメトリック光増幅器等をあげることができる。

【0080】

ラマン増幅器では、そこに入射される信号光と、励起光との間における偏光状態の相対関係にラマン利得が依存する。再生システム 1 においては、所望のラマン利得を得るのに適した偏光状態へと、偏波コンバータ 13 が信号光を予め偏光変換するので、ラマン増幅器は安定して信号光を増幅することができる。

【0081】

ラマン増幅器と同じように、半導体光増幅器やパラメトリック光増幅器もそれぞれの利得に偏光依存性がある。再生システム 1 においては、所望の利得を得るのに適した偏光状態へと、偏波コンバータ 13 が信号光を予め偏光変換するので、半導体光増幅器やパラメトリック光増幅器は安定して信号光を増幅することが

できる。

【0082】

クロック再生装置21は、非線形光学効果として、例えば、XPM若しくはFWMを利用するものがあげられる。

前者の(XPMを利用する)クロック再生装置21としては、図3に例示したものがあある。このクロック再生装置21は、パルス状の制御光を出射する制御光発生装置25と、光学遅延手段27及び制御部29により制御光に対して信号光の位相を揃える位相同期手段31と、光カプラ33を介して光路に介挿され、制御パルス光と信号光とが伝搬してXPMが発生する高非線形ファイバ35と、高非線形ファイバ35に制御光を入射若しくはそこから出射させるWDMカプラ37、39とを備えている。また、このクロック再生装置21は、高非線形ファイバ35からの信号光の戻りを防止するアイソレータ41と、光フィルター43を備えている。

【0083】

また、後者の(FWMを利用する)クロック再生装置21としては、図4に例示したものがあある。このクロック再生装置21は、パルス状の励起光を出射する励起光出射装置45と、励起光に対して信号光の位相を揃える位相同期手段31と、WDMカプラ47を介して励起光と信号光とが入射してFWMが発生する非線形光学媒質49とを備える。このクロック再生装置21においては、非線形光学媒質49に入射した信号光が、FWMを用いて波長変換された信号光とともに非線形光学媒質49から出射するので、波長変換されていない信号光及び励起光は、WDMカプラ51を用いて波長変換によって得られた信号光と分離される。

【0084】

図3及び図4に示したクロック再生装置21は、高非線形ファイバ35若しくは非線形光学媒質49中におけるXPMやFWMを利用して信号光に対してクロック再生処理を施している。このようなクロック再生処理においては、得られる非線形光学効果が小さい場合、良好に信号光のクロック再生をすることができなくなる。そのため、信号光と、制御光若しくは励起光との間において、それぞれの偏光状態を所定の相対関係にて維持し、得られる非線形光学効果の大きさを所

定の大きさに維持する必要がある。

【0085】

具体的には、クロック再生装置21に入射する信号光の偏光状態が直線偏光の場合、励起光若しくは制御光の偏光面と信号光の偏光面とが互いに平行になるように、信号光の偏光状態を維持する。これにより、クロック再生装置21は、所定の程度にて信号光のクロック再生を行なうことができる。

【0086】

波形再生装置19には、非線形光学効果としてソリトン効果、又は、SPM若しくはSCを利用するものがある。

【0087】

前者の（ソリトン効果を利用する）波形再生装置19は、例えば図5に示したように、増幅装置17aと、非線形光学媒質53と、光フィルター（バンドパスフィルター）55とから構成されている。ここで非線形光学媒質53としては、高非線形ファイバおよび半導体素子があげられる。なお、図5では、波形装置19内に増幅装置17aを配置（内蔵）させた例を示した。しかしながら、図2に示したように増幅装置17が配置され、この増幅装置17のみで波形再生装置19に入射する信号光の強度を十分に高めることが出来る場合は、増幅装置17aを必ず配置させる必要はない。つまり、波形再生装置19内の増幅装置17aは、必要に応じて配置させればよい。

【0088】

図5の再生装置19においては、増幅装置17aで強度が高められた信号光が非線形光学媒質53に入射し、この媒質中53中で発生するソリトン効果により、信号光に含まれる時間的な雑音成分が除去され、信号光の波形が再生される。

【0089】

後者の（SPM若しくはSCを利用する）波形再生装置19としては、図6に例示したものがある。この波形再生装置19は、増幅装置17aと、非線形光学媒質56と、光フィルター55と、波長変換部57とから構成されている。なお、図5と同様の理由で、増幅装置17aは必要に応じて配置される。

【0090】

図6の波形再生装置19においては、増幅装置17aで強度が高められた信号光が非線形光学媒質53に入射し、この媒質中56中で発生するSPM若しくはSCによって、時間的な雑音成分が除かれた信号光についてのみ波長帯が広げられる。

【0091】

そして、この波長帯が広げられた信号光が光フィルター55へと入射し、所定の波長帯を有する信号光のみが光フィルター55を透過することにより、信号光の波形が再生される。波形が再生された信号光は、波長変換部57に入射して波長変換を施される。

【0092】

ここで、波長変換部57による波長変換は、波形再生装置19から出射される信号光の波長帯を、媒質56にて広げられる前の波長帯に戻すためである。よって、波長帯を戻す必要がない場合には、波長変換部57を波形再生装置19に設ける必要はない。

【0093】

波長変換部57には、非線形光学効果として、例えばFWM、XPMもしくはSPMを利用するものがある。これらのうち、FWM若しくはXPMを用いるものは、基本的に上記したクロック再生装置21と同じ構成を有する。したがって、波長変換部57はクロック再生装置21を兼ねることができ、図6に示した波形再生装置19の場合は、その出射側にクロック再生装置21を配置する必要はない。

【0094】

また、波長変換部57にSPMを利用した場合は、増幅装置と、非線形ファイバと光フィルターによって構成することができる。

上述したように、波形再生装置19による信号光の波形再生処理は、媒質53、56、35、49中におけるSPM、XPM、FWM、ソリトン効果及びSC等の非線形光学効果を利用している。そして、XPMとFWMを利用した波形再生処理の場合には、制御光若しくは励起光の発生装置25、45から出射した制御光若しくは励起光と、信号光とを同一の媒質35、49に入射させることによ

りXPM若しくはFWMを発生させる。

【0095】

このような波形再生処理においては、得られる非線形光学効果が大きすぎても小さすぎても良好に信号光の波形を再生することができなくなるおそれがある。そのため、信号光と、制御光若しくは励起光との間において、それぞれの偏光状態を所定の相対関係にて維持し、発生する非線形光学効果の大きさを所望の大きさに維持する必要がある。

【0096】

雑音除去装置23は、波形再生装置19と同様に、増幅器、非線形光学媒質、および光フィルターなどで構成することができる。雑音除去装置23は、SPMやSC等の非線形光学効果を用いて、信号成分の波長帯を広げた後、信号部分と雑音部分とを分離している。

【0097】

なお、上記した波形再生装置19、クロック再生装置21、もしくは雑音除去装置23において用いられる制御光または励起光の発生装置としては、櫛型分散配置（櫛型分散プロファイル）を利用した光パルス光源、ファイバ型圧縮装置により圧縮された光パルス光源、スーパーコンティニューム光源、ソリトンパルス光源、ファイバーリングレーザのいずれかを用いるのが好ましい。なぜならば、これらの光源は、パルス時間幅が狭い高繰り返しパルスを発生させることが可能であって、更に、パルス時間幅及び繰り返しのパターンを、例えば信号光の周波数等を考慮して適宜設定することができるからである。

【0098】

次に、図7を参照して、偏波コンバータ13について詳述する。

偏波コンバータ13は、上記したように、任意の偏光状態を所望の偏光状態へと偏光変換する機能を有するものであればよい。このような偏波コンバータ13は、少なくとも、入射した光（信号光）に対して偏光変換を施して所望の偏光状態とする偏光変換部71を備えている。

【0099】

具体的には、制御光若しくは励起光が直線偏光である場合には、信号光の所望

の偏光状態としては、制御光若しくは励起光と偏光面が平行である直線偏光となるように、偏波コンバータ13で制御する。

【0100】

そして、偏波コンバータ13は、図7に示すように、偏光変換部71に入射する信号光の偏光状態を検出し、この検出結果に基づき偏光変換部71をフィードフォワード制御する。あるいは、偏波コンバータ13は、図8に示すように、偏光変換部71から出射した信号光の偏光状態を検出し、この検出結果に基づき偏光変換部71をフィードバック制御する。このため、図7および図8に示すように、偏波コンバータ13は、検出部73及び制御部75を備えているのが好ましい。その理由は、信号光を所望の偏光状態へと確実に偏光変換することができるからである。

【0101】

具体的に説明すると、検出部73としては、光分配器77により分波された信号光の偏光状態及び強度を検出可能な偏波アナライザ若しくは強度のみを検出可能なパワーメータ等があげられる。また、制御部はコンピュータにより構成することができる。

【0102】

次に、図9を参照し、入射した信号光を直線偏光へと変換する偏波コンバータであって、検出部及び制御部を備えていない一構成例を示す。

【0103】

この偏光変換部71は、入射した信号光を偏光面が互いに直交する2つの偏光へと分離する偏光分離素子79と、これらの2つの偏光を合波する合波器81とを備えている。そして、これら偏光分離素子79と合波器81との間には、2つの光路が延びており、そのうち一方の光路にのみ $\lambda/2$ 波長板83が介挿されている。

【0104】

この偏光変換部71に信号光が入射すると、偏光分離素子79により分離された偏光のうち、一方の偏光は、図中矢印で示したように紙面と平行な偏光面のまま合波器81へと入射される。一方、紙面と垂直な偏光面を有する他方の偏光は

、 $\lambda/2$ 波長板 83 を通過することによりその偏光面が 90° 回転させられて合波器 81 へと入射する。したがって、合波器 81 に入射した時点においては 2 つの光路を伝搬してきた各偏光の偏光面は揃っており、これら偏光が合波器 81 において合波されることにより得られる信号光は、必ず直線偏光となる。

【0105】

また、図 10 は、入射した信号光を直線偏光へと変換する偏波コンバータであって、偏光変換部 71 をフィードバック制御するための検出部 73 及び制御部 75 を備えたものを示している。

【0106】

この偏光変換部 71 は、入射した信号光を偏光面が互いに直交する 2 つの偏光へと分離する偏光分離素子 79 と、これら 2 つの偏光を合波する合波器 81 とを備えている。そして、これら偏光分離素子 79 と合波器 81 との間には、2 つの光路が延びており、そのうち一方の光路には $\lambda/2$ 波長板 83 が介挿され、他方の光路には、光学光路長を可変とするための光学遅延手段 85 が介挿されている。

【0107】

また、合波器 81 の出射側には、入射した信号光を所定の強度比で 2 つの光へ分光する光分配器 77 が配置されている。光分配器 77 の一方の出射側には、検出部 73 として、信号光を受光してその強度を測定するパワーメータが配置されている。そして、コンピュータ等からなる制御部 75 は、検出部 73 の検出結果から信号光の強度を制御するために、検出部 73 と電氣的に接続されている。その一方で制御部 75 は、検出部 73 から入力される検出結果、すなわち検出部 73 で検出する信号光の強度が最大となるように、光学遅延手段 85 を介して他方の光路の光学光路長を可変制御するために、光学遅延手段 85 ととも電氣的に接続されている。

【0108】

更に、図 11 は、入射した信号光を、直線偏光に限らず任意の偏光状態を有する信号光へと変換する偏波コンバータであって、偏光変換部 71 をフィードバック制御するための光分配器 77、検出部 73 及び制御部 75 を有するものを示し

ている。

【0109】

この偏波コンバータの偏光変換部71は、コリメータ86、87間を延びる信号光の光路上に順に配置された $\lambda/4$ 波長板89と、 $\lambda/2$ 波長板91と、 $\lambda/4$ 波長板93と、これら波長板の光軸を回転軸として回転させるために各波長板に装着された回転手段95、97、99とからなる。すなわち、この偏光変換部71においては、回転手段95、97、99によって波長板89、91、93を回転させることにより、信号光の偏光状態に対する各波長板89、91、93の進相軸及び遅相軸の方位が可変である。

【0110】

検出部73は信号光の偏光状態として例えばストークスパラメータを求めることが可能な偏波アナライザからなり、制御部75はこのストークスパラメータが所望の値となるように各回転手段95、97、99の回転角を調節する。したがって、図11に示す偏波コンバータによれば、任意の偏光状態を有する光を、所望の偏光状態へと偏光変換することができる。

【0111】

なお、図11の偏波コンバータにおいて、偏光変換部71が信号光を直線偏光へと偏光変換する場合には、図12に例示したように、再生装置15による再生処理に適した直線偏光を透過させるように、偏光変換部71の出射側に直線偏光子101を配置し、かつ、検出部75は信号光の強度を検出するパワーメータとするのが好ましい。

【0112】

その理由は、信号光 λ_1 が偏光子101を通過することにより、信号光の偏光度を高めることができ、再生装置15による再生の程度を一層安定させることができるからである。また、後述するように偏波コンバータ13の入射側に光増幅器105が配置された場合（図13を参照）には、この光増幅器105にて増幅された雑音、すなわち、信号光 λ_1 に付加された無偏光である自然放出光が除去され、信号光 λ_1 の信号雑音比を向上させることができるからである。

【0113】

図13は、本発明に係る第2実施形態の波長分割多重光再生システム103（以下、再生システム103という）を示している。

再生システム103は、分波装置8と偏波コンバータ13との間を延びる光路12₁、12₂、12₃、…12_nに光増幅器105が介挿され、かつ、偏波コンバータ13と光信号再生装置15との間を延びる偏波保持型導波路12a、12b、12c、…12nに可変分散補償器107が介挿されている以外は、再生システム1（図1参照）と同じ構成を有している。

【0114】

光増幅器105は、分波装置8と偏波コンバータ13との間に配置され、分波装置8から光路12₁、12₂、12₃、…12_nを伝搬してきた信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n を受光する。そして、光増幅器105は信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n を所定の強度へと増幅した後、光路12₁、12₂、12₃、…12_nへと出射させる。

【0115】

すなわち、光増幅器105はそこに入射した信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n の強度を適宜増幅して出射し、そのことによって、例えば波長分割多重通信システムを伝搬してきた信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n の減衰が大きい場合であっても、その減衰を補償することができる。

【0116】

ただし、光増幅器105を配置する位置は、分波装置8と偏波コンバータ13との間に限定されることはなく、分波装置8と再生装置15までの間のいずれの位置であってもよい。あるいは、光増幅器105は分波装置8の入射ポート8a側に配置され、波長分割多重光に含まれた状態にて信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、… λ_n を増幅してもよい。

【0117】

また、光増幅器105による信号光の増幅率は、偏波コンバータ13に含まれる検出部及び制御部によりフィードバック制御若しくはフィードフォワード制御してもよい。

【0118】

偏波コンバータ13と再生装置15との間には可変分散補償器107が配置され、偏波コンバータ13から出射した信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n は、偏波保持型導波路12a、12b、12c \dots 12nを伝搬して可変分散補償器107に入射する。可変分散補償器107は、伝送路を伝搬することで蓄積された伝送路の波長分散による信号光の波形歪みを補正した後、偏波保持型導波路12a、12b、12c \dots 12nへと出射させる。

【0119】

なお、可変分散補償器107を配置する位置は格段限定されることはなく、偏波コンバータ13と再生装置15との間、分波装置8と光増幅器105との間、光増幅器105と偏波コンバータ13との間、再生装置15と合波装置10との間であってもよい。

【0120】

図14は、本発明に係る第3実施形態の波長多重分割光再生システム109（以下、再生システム109という）を示している。

【0121】

再生システム109は、偏波モード分散補償装置110が、可変分散補償器107と再生装置15との間を延びる偏波保持型導波路12a、12b、12c、 \dots 12nに介挿されている点が、図13に示した再生システム103と異なっている。

【0122】

この偏波モード分散補償装置110は、伝送路中に局所的かつランダムに存在する複屈折が、偏波モードに伝搬速度差を与え信号光の時間波形を歪ませるといふ、偏波モード分散を補償する装置である。

【0123】

したがって、再生システム109によれば、伝送路中の偏波モード分散による波形歪みが補償されるので、再生システム109を出射した後における信号光若しくは波長分割多重光の伝送可能距離を延長することができる。

【0124】

図15は、本発明に係る第4実施形態の波長分割多重光再生システム111（

以下、再生システム111という)を示している。

【0125】

この再生システム111は、合波装置が偏波インターリーバ機能を有する偏波インターリーバ112であり、また、偏波インターリーバ112の出射側に、偏波インターリーバ112から出射した波長分割多重光の偏光状態を偏光変換するための偏波コンバータ114が設置されている点において、再生システム103と異なっている。

【0126】

偏波インターリーバ112は、互いに波長の異なる複数の信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots 、 λ_n を合波する際に、波長において隣り合う信号光同士を、互いに偏光状態が直交するように合波する偏波インターリーブ機能を有している。

【0127】

したがって、偏波インターリーバ112により合波された波長分割多重光が同一の光路を伝搬した際には、波長において隣り合う信号光間、言い換えれば、隣り合うチャンネル同士間での相互作用による信号光の劣化が抑制される。

【0128】

また、偏波コンバータ114は、偏波コンバータ114と、次の波長分割多重再生システム、もしくは、受信器との間を延びる光伝送路(光ファイバ6)において、波長分割多重光に対する偏波モード分散の影響が最小となる偏光状態へと、偏波インターリーバ112の出射ポート112aから出射した波長分割多重光に偏光変換を施す。

【0129】

したがって、この再生システム111によれば、この再生システム111に入射した波長分割多重光を再生するのみでなく、波長分割多重光の偏光状態を再生システム111から出射した後に、伝搬する光路に適した偏光状態とすることが可能である。例えば、再生システム111は、次の波長分割多重再生システム若しくは受信器に入射するまでの間、波長分割多重光の劣化を抑制することができる。

【0130】

なお、この再生システム111においては、光増幅器105を、分波装置8と偏波コンバータ13との間ではなく、偏波コンバータ13と再生装置15との間を延びる偏波保持導波路12a、12b、12c、 \dots 12nに介挿し、偏波コンバータ13の検出部にて検出された信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n の強度に基づき光増幅器105をフィードフォワード制御している。

【0131】

この場合、再生装置15に入射する信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n の強度を一定にすることができるので、より一層再生装置15による信号光 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots λ_n の再生の程度を安定化することができる。

【0132】

図16は、本発明に係る第5実施形態の波長分割多重再生システム116（以下、再生システム116という）を示している。

【0133】

この再生システム116は、互いに接続された複数のサブシステム116a、116b、 \dots を含んでいる。

各サブシステム116a、116b、 \dots は、光路12₁の両端近傍、すなわち分波装置8側及び合波装置112側に、それぞれ、光スイッチ118a、118b、 \dots 及び120a、120b、 \dots が介挿されている以外は、再生システム111と同じ構成を有する。なお、図16中、線の錯綜をさけるために各サブシステム116a、116b、 \dots における光路12₁以外の光路12₂、12₃、 \dots 12nの記載を省略した。

【0134】

図16に示したシステム116においては、光スイッチ118aと118bとの間が光路122で接続され、光スイッチ120aと120bとの間が光路124で接続されている。

【0135】

したがって、各サブシステム116a、116b、 \dots は、光路12₁もしくは偏波保持型導波路12aに少なくとも1つの光スイッチが介挿されていることにより、自身の分波装置8により分波された信号光ではなく、波長分割多重光通信

システムの他の箇所から伝搬してきた信号光に対しても再生処理を施すことができる。

【0136】

そして、これら各サブシステム116a、116b、…を光路122、124で接続することにより、再生システム116は全体としてルータ機能を備えている。

【0137】

なお、光スイッチ118a、118b、…、もしくは、光スイッチ120a、120bは、半導体光スイッチであるのが好ましい。再生システム116の大型化を防止できるとともに、サブシステム116a、116b、…間で光路を切換えるスイッチング速度を高めることができるからである。

【0138】

詳しくは、半導体光スイッチは、半導体材料に、異方性エッチング若しくは犠牲層エッチング等のマイクロマシーニング技術を適用して形成された光スイッチであって、Micro-Electro-Mechanical-System（以下、MEMSという）の一種である。

【0139】

本発明は、上記した実施形態に限定されることはなく、種々変形が可能である。例えば、図2の再生装置15を半導体基板上に集積回路として形成することで、再生装置15を一体化・小型化することができる。

【0140】

また、再生装置15においては、波形再生装置、雑音除去装置及びクロック再生装置は、互いに同じ非線形光学効果を利用する場合には同一の機能を有することがあることから、これらのうちいずれか一つ又は二つを省くことが可能であり、もって再生装置15を構成する装置の数を減少させることができる。

【0141】

以下に、本発明の再生装置（図1参照）について詳述する。

図17は、再生装置200の一実施例を示す概念図である。この再生装置200は、soliton converter 202、pulse roller 204、Kerr-shutter 206そし

て soliton purifier 208 が順に配置されて構成される。

【0142】

はじめに、伝送によって劣化された光信号 210 が soliton converter 202 によって残留チャープ除去とともに波形整形される。その後、pulse roller 204 に入力され、そこでは波形整形された信号光が次段の Kerr-shutter 206 に適した波形である矩形波に変換される。以上のような前処理の後、Kerr-shutter 206 を用いて信号光は波形再生されるだけでなく時間再生され得る。最後に、その再生された信号光をより高品質にする為に、soliton purifier 208 によってソリトン以外の成分、例えば光増幅に伴い発生する自然放出光などを除去する。以下では、この再生装置 200 の各コンポーネントについて説明する。

【0143】

再生装置 200 の初段は、soliton converter 202 である。なお、soliton converter 202 の関連技術は、Dany et al., Opt. Lett., 25, p.793, 2000 や、Matsumoto et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 14, p.319, 2002 に記載されている。

【0144】

図 18 は、soliton converter 202 の一構成例である。soliton converter 202 は、異常分散ファイバ (anomalous-dispersion fiber : ADF) 212 と、光フィルタ (band-pass filter: BPF) 214 とで構成される。入力された信号光は異常分散ファイバ伝搬に伴い異常分散性と非線形性の相互作用により soliton-like なパルス列に変換され、更に光フィルタ 214 を通過することによってソリトン以外の成分が除去される。ただし、ADF 212 への入力光パワーがソリトン効果発生に不十分な場合は、図 18 に示すように、ADF 212 の前段に光増幅器 216 とそこで発生する自然放出光を除去する為の光フィルタ 218 を配置させてもよい。

【0145】

なお、図 18 に示した soliton converter 202 の構成では、ソリトン伝搬におけるソリトン効果を介する入力雑音の増幅が問題となる場合がある (Kubota et al., J. Opt. Soc. Am. B, 16, p.2223, 1999)。これは雑音を伴うソリトンが

ファイバ伝搬においては異常分散と非線形性の相互作用によって生じるパラメトリック利得を介して振幅・位相雑音が増幅される為である。

【0146】

これを抑圧する為には、soliton converter 202において、ADF 212のファイバ長をソリトン周期の3倍以下とすることが好ましい。ADF 212のファイバ長が短くなると、雑音とソリトンが伝搬する距離が減少し、そのままそれらの相互作用の抑圧につながる。従って、ADF 212の短尺化は波形整形に伴う雑音増幅の低減化に有効である。

【0147】

これに反し、十分な波形整形機能の実現には、非線形効果が必須である。従って、非線形効果発生に必要なファイバ長（非線形長）以上のファイバ長がsoliton converter 202に必要となる。このsoliton converter 202の性能のファイバ長依存性を実験的に明らかにする為、ソリトン周期で規格化したファイバ長（規格化ファイバ長： z ）が異なる3種類の光ファイバに対するsoliton converter 出力パルスの光信号雑音比（OSNR）とスペクトル線幅増大の入力パワー P_{in} 依存性を測定した。その結果を図20(a)と図20(b)に示す。ただし、ソリトン次数 N （ P_{in} を基本ソリトン励起パワーで規格化した値の平方根）をその横軸にとった。

【0148】

図20(a)および図20(b)からわかるように、規格化ファイバ長： z によらず、全てのsoliton converterにおいて N の増大に伴いOSNRが劣化する。しかしながら、ADF 212のファイバ長が、ソリトン周期の2周期程度のファイバ長ではその劣化が小さいことが示されている。また、このsoliton converterのみがスペクトル線幅（ $\Delta\nu/\Delta\nu_{in}$ ）が増大しないことも示されている。以上の実験結果から、規格化ファイバ長 z が小さいsoliton converterが雑音増幅抑圧に有効であることが示された。

【0149】

また、soliton converter 202は再生装置200の初段に配置される為、その入力パルスは残留分散によってチャープを有する場合がある。信号光は、チャー

プを有すると、パルスに変換される際、パルス幅が広がってしまうという問題が生じる。このため、soliton converter 2 0 2 は、入力パルスが有するチャープに対する性能も重要となる。

【0 1 5 0】

これを検討する為、single-mode fiber (SMF) によってチャープが付加されたパルスをsoliton converter 2 0 2 に入力し、出力されたパルス波形を測定した。その出力パルスの自己相関波形幅 Δt_{AC} の入力パワー P_{in} 依存性を図 2 1 に示す。図 2 1 の左部は、出力光フィルタに入力する前のパルス幅を示し、図 2 1 の右部は出力光フィルタから出力されたパルス幅である。

【0 1 5 1】

図 2 1 からわかるように、入力チャープ量を増大させた (SMF 長を増加させた) 場合、 P_{in} を増大させることにより、入力のチャープ量 (SMF の長さ) にかかわらず Δt_{AC} が減少する傾向が示されている。つまり、この実験結果を解釈すると、入力チャープ依存性は P_{in} 調整によって補償することが可能ということである。これを直接的に実験によって確認した結果を図 2 2 に示す。

【0 1 5 2】

図 2 2 の左部は、入力パルス波形を示し、図 2 2 の中央部は、 P_{in} 調整を行った場合のsoliton converterからの出力パルス波形を示し、図 2 2 の右部は出力フィルタからの出力パルス波形を示している。図 2 2 の左部のように、特性が異なるパルス列をsoliton converterに入力しても、 P_{in} を調整することにより、出力パルス波形は、同様なパルス波形が得られることが示されている。

【0 1 5 3】

本実施例の短尺soliton converterにおける出力ソリトンの自己相関幅 Δt_{AC} と、OSNRの P_{in} 依存性を図 2 3 に示す。上述したように、長尺型に比べてOSNR劣化がある程度抑圧されている。その一方で、 Δt_{AC} が極小となる P_{in} においてはOSNRが著しく劣化してしまう。

【0 1 5 4】

言い換えると、パルス圧縮と雑音増大にはトレードオフ関係がある。雑音抑圧とパルス圧縮を両立する手法が本発明の一つである圧縮器と波形整形器の組合せで

ある（図19）。波形整形器の前にパルス圧縮器が配置される構成である。ここでは、波形整形器は前述のsoliton converterだけでなくMamyshev 02RやNOLMなども含まれる。一般に、入力パルスピークパワーが高いほどファイバ非線形効果を基本とする波形整形器の性能は向上され得る。これを活用するのが本発明である。事前にパルス列を圧縮しピークパワーを増大させ波形整形器に入力する方式である。

【0155】

次に、時間再生装置であるKerr-shutter 206の実施例を図24に示す。本実施例はOPLL (optical phase locked loop) 220と光スイッチ部222とからなる。OPLL 220は、光位相比較器224と、光LO発生器226と、制御部228とから構成される。

【0156】

OPLL 220では、位相比較器224によって外部から入力される信号光と光LOの位相差を検出し、制御部228ではその位相差に基づき光LOの繰返し周波数を調整する。その結果として、外部信号光と同期した光クロックパルス列が得られる。このクロックパルス列と外部信号光を光領域でスイッチングすることによって、時間再生された信号光が得られる。以下では、本発明各部の詳細を示す。

【0157】

上述したように、本実施例のOPLL 220は、光位相比較器224と、光LO発生器226と、制御部228とから構成される。光位相比較器224は、光ファイバから構成されるFWM部230と、光フィルタ232と、受光部234を基本構成としたものである。FWM部230は、非線形性光ファイバから構成される。

【0158】

OPLL 220では、外部からの信号光と光LOをFWM部230に入力することにより、新規にFWM光が発生する。このFWM光は、光フィルタ232により抽出されフォトダイオード (photo-diode: PD) からなる受光部234に受光される。

【0159】

受光部234及び制御部228では、この出力電気信号を位相差信号として認識し、この認識に基づき光LOの発振周波数（繰返し周波数に対応）を調整する。この結果、外部信号光に同期したクロックパルス列が得られる。なお、FWM部230において非線形性を十分に起こす（FWMを効率良く発生させる）為には、必要に応じて（図24に示すように）、EDFAや半導体光増幅器などの光増幅器236及び光フィルタ（図示せず）をFWM部236の前段に配置させてもよい。

【0160】

一方、光LO発生器226は2台の半導体レーザ238（laser diode: LD）から構成される。それら出力CW光を光カプラ240により合波することによってビート光が得られる。なお、ビート光の周波数は、LD238の少なくとも一方の駆動電流及び温度を調整することによって制御される。

【0161】

このビート光を光LOとして光位相比較器224へ入力させるとともに、クロック信号として光スイッチ部222にも入力される。また必要であれば、光スイッチ部222に入力する前に、ファイバ圧縮によってビート光からソリトン列へ変換し事前に光スイッチ部222に適した波形にクロック信号波形を整形してもよい。

【0162】

クロック抽出において最も重要なのは、出力されるクロックパルス列のタイミングジッタ低減化である。言い換えると、パルスの時間的位置の正確さである。本実施例においては、タイミングジッタを低減化する為に、以下の2つの手法がなされている。

【0163】

一つ目は、OPLL220のループ短尺化である。タイミングジッタはOPLL220のループ長に相関があり、ジッタ抑圧にループ短尺化（ファイバ短尺化）が有効である。特に、本実施例では、位相比較器224がFWMを基本とした構成となっているため、従来のNOLM型に比べ、よりループの短尺化を実現する

ことができる。この結果、本実施例では、ジッタが抑圧されたクロックパルス列を得ることが可能となる。位相比較器 2 2 4 の F W M 部 2 3 0 の光ファイバとしては、通常の伝送路用ファイバに比べて 5 倍以上の非線形係数を有する高非線形ファイバ (highly-nonlinear fiber: HNLF) を採用することでも、ループ長 (ファイバ長) の減少化が実現される。

【 0 1 6 4 】

二つ目は、L D ペア駆動回路である。高出力光発生部では、2 台の L D を直列駆動することにより、駆動電流源に由来する L D 波長揺らぎをキャンセルすることが可能となる。実際に、この L D 直列駆動による雑音抑圧効果を測定した結果を図 2 5 に示す。図 2 5 (a) は、L D ペアの独立駆動時のタイミングジッタ特性を示し、図 2 5 (b) は、L D ペアの直列駆動時のタイミングジッタ特性を示すものである。独立駆動時に比べて直列駆動時のジッタが $1 / 1 0$ に低減されていることが示されている。L D の直列駆動による雑音低減の理由は、二つの L D の駆動電流変化が等しいことにあります。このため、L D ペア駆動回路の代わりに、カレントミラー回路を用いても同じ状況が実現される。

【 0 1 6 5 】

光スイッチ部 2 2 2 は、F W M 部 2 4 2 と、光フィルタ 2 4 4 と位相調整部 2 4 6 から構成される (図 2 4 を参照)。位相調整部 2 4 6 以外は、位相比較器 2 2 4 と同様の構成である。

【 0 1 6 6 】

光スイッチ部 2 2 2 では、まず、信号光とクロックパルス列を F W M 部 2 4 2 に入力する。F W M 部 2 4 2 からの出力では時間再生された信号光が F W M 光として発生する。その光波は光フィルタ 2 4 4 によって入力光成分と分離され出力される。

【 0 1 6 7 】

ただし、クロックパルスと信号光は O P L L 2 2 0 によって同期している (周波数は一致している) もの、その位相を合わせる必要がある。その為に、信号光パルスの少なくとも一方の光パスに挿入された可変光遅延線 (delay line: DL) からなる位相調整部 2 4 6 によって位相が調整される。この位相調整量は出力パ

ルスの一部を受光して得られる電気信号に基づき決定される。

【0168】

次に図26(a)から(c)を参照し、光受光部234(図24参照)における位相誤差信号を認識する電子回路の構成を説明する。図26(a)は、光受光部234の一構成例である。光受光部234は、Photo diode(PD)と、loop filterと、LDコントロール部とからなる。なお、LDコントロール部は、LDの駆動電流や、温度を制御する機構である。

【0169】

図26(a)の光受光部234では、光スイッチ出力光をPDで受光した後、その低周波信号成分をloop filterで挿出する。この出力電気信号に基づき、LD駆動電流を制御することによって、ビート光発生部のLD出力波長、すなわちビート周波数をコントロールする。

【0170】

図26(b)は、図26(a)の変形例であり、2台のPDと、加算器と、loop filterと、LDコントローラとから構成される。図26(b)では、光スイッチ出力だけでなく、信号光パルスの光パワーを2台のPDで受光し、それらの出力差をloop filterに入力する。これによって、信号光パルスと光LOの位相ズレに基づく位相差信号の変化の消光比が向上される。図26(b)の光受光部の構成では、より高感度となる。

【0171】

図26(c)は、図26(a)の更なる変形例であり、PDと、乗算器と、loop filterと、加算器と、LDコントローラと、参照信号発生器とから構成される。光スイッチ出力をPDで受光した後に、参照信号と乗算した電気信号の低周波成分をloop filterによって挿出する。さらに、それと参照信号の差に基づきLDをコントロールする。図26(c)の光受光部の構成では、より効率的に光スイッチ出力光パワー最大値のポイントを見出すことができる。

【0172】

また、上述の光時間再生システムの位相比較部224と光スイッチ部222のFWMファイバを融合化させることも可能である。その構成を図27に示す。光位

相比較器と光スイッチ部が共通の FWM 部 2 5 0 と光 L O 発生部 2 5 2 から成る。各部要素は前述の図 2 4 と同様である。入力信号光と光 L O を FWM 部 2 5 0 に入力し、そこで発生する FWM 光を光フィルタ 2 5 4 で抽出する。その FWM 光を位相誤差信号として光 L O 周波数コントロール部に入力すると共に、クロックパルス列として出力する。

【 0 1 7 3 】

以上、光再生システムに必要最低限のコンポーネントに関して記述した。更に、本発明の再生装置 2 0 0 (図 1 7 参照) では、その性能を向上させる為に pulse roller と soliton purifier を用いる。以下ではそれらの実施形態例を紹介する。

【 0 1 7 4 】

pulse roller 2 0 4 の一実施例を図 2 8 に示す。信号光パルスを pulse roller ファイバ 2 6 0 に入力する構成である。その pulse roller ファイバ 2 6 0 における正常分散性と非線形効果の相互作用によって入力された信号光は矩形化される。非線形効果がパルススペクトルを広帯域化させ、加えて正常分散効果によってパルス時間波形が矩形化される。

【 0 1 7 5 】

本発明では高効率な矩形化現象を起こす為に、pulse roller ファイバ 2 6 0 として正常分散増大ファイバ (normal-dispersion-increasing fiber: NDIF) を用いている。この NDIF の分散プロファイルを図 2 9 (a) に示す。

【 0 1 7 6 】

図 2 9 (a) に示すように、NDIF の入力側では低分散値を有する為に、相対的に非線形効果が支配的となる。一方、NDIF の出力側は、高分散値を有する為に、正常分散効果が支配的となる。従って、NDIF の入力側において、パルスは十分にスペクトル広帯域化される。そして、NDIF の出力側において、パルスは強正常分散効果によってそのパルス時間波形が効率良く矩形化される。

【 0 1 7 7 】

この結果、pulse roller ファイバ 2 6 0 (光ファイバ: NDIF) の短尺化が可能となる。これは、非線形長 L_{NL} と分散長 L_D を用いて定量的に示すと、入力端では $L_D \gg L_{NL}$ であり、出力端では $L_D \ll L_{NL}$ と設計されている。ただし、分散長 L_D は、

$L_D = T_0^2 / |\beta_2|$ で表される。 T_0 と β_2 は入力パルス時間幅と分散値を表す。
 また、 $L_{NL} = 1 / \gamma P_0$ である。 γ と P_0 は非線形係数と入力ピークパワーである。

【0178】

次に pulse roller 204 の他実施例について説明する。図 29 (b) および図 29 (c) は、図 29 (a) の他実施例である。NDF (図 29 (a) 参照) の代替として、分散値・非線形係数が異なる 2 種類以上の光ファイバを組合せた分散マネジメント光ファイバ 260 (楕型・ステップ型分散プロファイルファイバ) を用いた pulse roller 204 である。

【0179】

図 29 (b) および図 29 (c) のファイバいずれを有する pulse roller 204 も図 29 (a) の pulse roller ファイバ 260 を有するものと同様の作用・効果を有する。つまり、いずれの pulse roller 204 も、入力端側の部分では非線形効果の作用が支配的であり、出力端側の部分では分散効果の作用が支配的である。

【0180】

図 29 (b)、図 29 (c) に示す pulse roller 204 は、pulse roller ファイバ 260 が、非線形効果が支配的となる光ファイバと、分散効果が支配的な光ファイバとを順に配置させた組合せである。

【0181】

次に、pulse roller ファイバ 260 が 2 種の光ファイバから構成される pulse roller 204 を用いたパルス矩形化の一実験構成例を図 30 (a) にしめす。160 GHz 繰返しの 2 ps パルス列を pulse roller ファイバ 260 に入力する構成である。この pulse roller ファイバ 260 の分散プロファイルを図 30 (b) に示す。図 30 (b) は、横軸が光ファイバの長さであり、縦軸が分散値である。なお、図 30 (b) に示す pulse roller ファイバは、HNL F の長さが 200 m、分散値が $D = -0.7$ ps/nm/km であり、NDF の長さが 80 m、 $D = -7.5$ ps/nm/km である。

【0182】

ここでは、非線形効果が支配的となる光ファイバに高非線形ファイバ (highly-n

nonlinear fiber: HNLF) を用いている。HNLFは、伝送路用ファイバが持つ非線形定数以上のそれを有する光ファイバである。このHNLFを用いることによって、光ファイバの短尺化が可能となる。

【0183】

次に、パルス矩形化について、図41(a)乃至(d)及び図42を参照して説明する。

【0184】

図41(a)のパルスが正常分散ファイバを伝搬する際、矩形パルスへ変形するが、この際、正常分散の効果と非線形効果(Kerr効果)の相互作用が不可欠である。つまり非線形効果によって、図42の下部のようなアップチャープが生じ、正常分散の効果で低い周波数成分が速く、高い周波数成分が遅く伝搬する。この結果、図41(b)のような形に変形する。

【0185】

詳しく述べると、図42に示すように、パルス強度の変曲点に相当する T_1 と T_2 の間では、線形アップチャープによって、正常分散の効果でパルスが線形的に広がる。なお、 T_0 はパルスの中心位置である。一方、 $T_x < T_1$ および $T_x > T_2$ では(T_x とは任意の時間)、ダウンチャープとなっているため、パルス先端部では先端ほど($|T|$ が大きいほど)ゆっくり、後端部では後端ほど($|T|$ が大きいほど)速く伝搬する。つまり時間 T_1 および T_2 の部分にエネルギーが集まり、パルス強度は時間に対して急峻に変化するようになる。その急峻さは、 T_1 および T_2 における瞬時周波数の最大値に比例する。

【0186】

従来のように、pulse rollerに分散値が一定のファイバを使用する場合、非線形効果を発生させるために大きな入力パワーと、分散効果を発生させるためにある程度大きな分散値の両方が必要だった。この理由は、分散値が低い場合、非線形効果によってアップチャープは生じてても、分散の効果が小さいために、波形が矩形に変化しないためである。一方、分散値が大きい場合、非線形効果によって生じたアップチャープを持つ成分が、分散の効果ですぐに拡散してしまい、さらにピークパワーが小さくなることからチャープが蓄積されないままパルスが伝搬す

ることになる。

【0187】

この結果、図4 1 (b)のようにパルスの立ち上がりは鈍く、頭頂部はもとの図4 1 (a)に示したパルスの立ち上がりとは本質的に変わらず、上に凸なものとなる。パルスの立ち上がりの急峻さは、スペクトルに含まれる高周波成分に依存するため、立ち上がりが鈍いという事実は、十分な非線形効果による高周波成分の発生がなされていないことにも対応する。

【0188】

上述内容から効率的にパルスを矩形化するためには、まず分散の影響があまりない状態において、非線形効果によるアップチャープを十分に蓄積した上で、その後大きな分散効果によってパルスを変形させればよい。そのような状況は、長さ方向に対して正常分散値を増大させるような光ファイバを用いれば実現できる。

【0189】

より詳細に述べると、まず光ファイバの入射端では、パルスの入射電力に対応する非線形距離が、入射パルスの幅と分散値に対応する分散距離よりも、十分短いように設計する。この結果、分散の効果よりも非線形効果が支配的になり、伝搬初期に十分に大きなアップチャープが蓄積される。

【0190】

さらに光ファイバの出射端では、分散距離が非線形距離よりも短く、分散効果が支配的となるように設計する。すでに非線形効果によって高周波成分が発生しているため、パルスの立ち上がりは急峻なものとなる。一方、そのときのパルスは大きなアップチャープを持つスーパーガウシアン型関数で近似できる。そのようなパルスは、正常分散の効果が支配的なファイバを伝搬する際、図4 1 (c)のようにパルス中心部が上に凸から下に凸の関数になることが、簡単な計算によって確認できる。図4 1 (b)から図4 1 (c)の状態に変形する途中でパルスを出力させることにより、図4 1 (d)のように頭頂部がほぼ平らな矩形パルスを作り出すことができる。

【0191】

次に、図30 (b)のpulse rollerファイバにおける2 psパルス伝搬シミュレー

シヨンの結果を図31に示す。実線が出力パルスの実時間波形であり、それに対応する自己相関波形が破線で示されている。 P_0 は入力ピークパワーである。 $P_0=23.5$ dBmにおいて実線で示された出力パルス波形が矩形化されていることが示されている。その時の自己相関波形（破線）は三角状となる。

【0192】

これらに対して、白丸が自己相関波形の実験結果である。実験では160GHzパルス列を用いている為に、パルス裾部分のパルス重なりが生じる領域では白丸と破線の乖離が大きいものの、パルス中心部分では両者が良く一致することが示されている。従って、実験でもシミュレーションと同様に $P_0=23.5$ dBmにおいて実線で示された矩形化パルスが得られていると考える。

【0193】

上述したpulse roller 204を光スイッチ部（図24を参照）の前段に配置することによって、時間再生装置・時間分割装置の高性能化が実現可能である。つまり、図24を参照すると、第一のカプラと光スイッチ部の間、もしくは光LO発生器と光スイッチ部の間に配置されることになる。その一実施例を図32に示す。

【0194】

図32では、上述したpulse roller 204は、光スイッチ部222の前段に配置され、外部信号光あるいはクロックパルスをpulse roller 204によって矩形化した後、光スイッチ部222にて光スイッチする構成である。なお、この場合、光スイッチ部222の構成は、図24に示したようなFWM構造に限定されず、NOLM型、SOA(semi-conductive optical amplifier)型としても良い。

【0195】

一方のパルスが矩形化されている為、外部信号光のタイミングジッタによる両者の相対時間位置ズレからの強度揺らぎへの変換が抑圧される。この原理は前述（図39）した通りである。矩形化パルスの平坦幅がこの抑圧範囲に相当する。

【0196】

ここでは前述のpulse roller 204とOPLL 220を組合せたクロック抽出器の実施例を記述する。その構成を図33に示す。pulse roller 204と図24内

のクロック抽出器から成る。

【0197】

信号光パルスはpulse roller 204によって矩形化された後に、その矩形化パルスと光LOをFWM部に入力する。そこで発生するFWM光を受光部で電気信号に変換する。本発明の一つの特徴は、このFWM光を誤差信号と認識する方式にpulse rollerの出力パルス特性を利用する点である。

【0198】

図24に示す光スイッチ部では、入力信号光と光LOのピーク値の設定が重要となる。光スイッチ出力の平均パワーの変化から入力信号光と光LOの位相差を検出する為には、両者のピークの時間位置をズラす必要がある。

【0199】

図24に示す光スイッチ部において、図26に示した光受光部を使用する場合、光の平均強度を利用して位相検出を行うため、光スイッチ部と光LOの光信号のピークの時間位置を等しくする必要がある。このため、図24に示した光スイッチ部は、OPLLと別々に動作させる必要がある。

【0200】

また、周波数変調が加えられた光LOからの出力光により位相検出を行う方法は、入力パルスピークと光LOからの出力光の強度ピークが平均的には一致するが、各パルスのピーク同士の時間差は変調周波数で変化する。さらに、光LOからの出力光は、周波数変調が加えられているため、複数回、光再生を行うたびにタイミングジッタが積算される場合がある。

【0201】

これらに対し、図35(a)および図35(b)に示す光受光部では、FWM光のスペクトルによる位相検出は、平均値処理でありながらピーク値が一致する。そのため、光スイッチ部とOPLLの両方の機能を一度に行うことができる。

【0202】

典型的なpulse roller出力パルスの時間波形とチャープ（瞬時周波数の時間変化）特性をそれぞれ図34(a)、34(b)の最上部に示す。一般に、正常分散と非線形効果の相互作用によって矩形化されるパルスには線形チャープが蓄積さ

れる。このパルスと変換限界パルス（図 3 4 の中央部）から発生する F W M 光も線形チャープを有する。この F W M パルス特性を図 3 4 の最下部に示す。

【 0 2 0 3 】

矩形パルスが線形チャープを有する為に、入力パルス間の時間ズレが出力 F W M 光の周波数ズレに変換される。よって、この F W M 光の周波数ズレをモニタリングすることで入力パルス間の位相差を認識できる。F W M 光から位相差を認識する光受光部を図 3 5（a）、図 3 5（b）に示す。

【 0 2 0 4 】

この光受光部は、図 3 5（a）に示すように、分波器 2 6 2 と、2 つ以上の光フィルタ 2 6 4（図 3 5（a）では 3 つ配置）と各フィルタ出力光パワー比較器 2 6 6 とから構成される。この分波器 2 6 2 と複数の光フィルタ 2 6 4 の代わりに、図示しないが、A W G（arrayed waveguide）を用いることも可能である。

【 0 2 0 5 】

この光受光部では、まず F W M 光を分波器 2 6 2 で 3 分波し、各光波を異なる透過周波数を有する光フィルタ 2 6 4 に入力する。各フィルタ出力パワーの差は F W M 光の周波数ズレ、即ち光位相比較器入力パルス間の時間ズレ、に対応する。従って、このパワー差のモニタリングによってパルス間の時間位置ズレを認識することができ、これに基づき光 L O の周波数を調整する。なお、図 3 5（b）は図 3 5（a）に示した光受光部の他実施例であり、グレーティングと P D からなる。図 3 5（b）の光受光部は、図 3 5（a）と同様の効果を有する。

【 0 2 0 6 】

次に、本実施例の雑音除去装置である soliton purifier 2 0 8 を図 3 6（a）に示す。ソリトンファイバ 2 7 2 が 2 台の光フィルタ 2 7 0、2 7 4 の間に配置される構成である。

【 0 2 0 7 】

soliton purifier 2 0 8 に入力される光信号パルスは、入力側光フィルタ 2 7 0 によって信号光帯域外の雑音が除去される。その後、異常分散性を有するソリトンファイバ 2 7 2 に入力される。このソリトンファイバ 2 7 2 では、ソリトンが波長に対する利得の傾き（以後利得スロープと呼ぶ）を感じるように制御されて

いる点が重要である。この利得スロープの存在の結果として、ソリトンが波長シフトする。波長シフトしたソリトンは出力側光フィルタ 2 7 4 によって抽出される。

【0 2 0 8】

ここで本発明の特徴は、ソリトンの波長シフトを効率良く実現する為に利得スロープが制御されている点である。本実施例では、以下の2つの手法が成されている。

【0 2 0 9】

一つ目の手法は、ソリトンファイバとしてHNLFを活用した点である（図 3 6 (b)）。ファイバにソリトンが伝搬すると、ソリトン自身がポンプとなり低周波側にラマン利得を形成させる。その利得スロープをソリトン自身が感じたことによって、ソリトンの中心周波数が低周波側にシフトする。この現象がソリトン自己周波数シフト (soliton self-frequency shift: S S F S) である。一般的な、HNLFにおけるラマン利得を図 3 7 (a)に示す。比較の為にSMFのラマン利得も示す。

【0 2 1 0】

HNLFは、SMFに比べて大きな利得スロープを有する為、ファイバ長が短くてもSSFS効果が増強され得る。従って、HNLFを使用することにより、ファイバを短尺化することが可能となり、その結果としてファイバ損失が低減されるだけでなく、ソリトン間の相互作用も抑圧され得る。

【0 2 1 1】

二つ目の手法は、外部ポンプ光によってラマン増幅する点である（図 3 6 (c)）。図 3 6 (c) では、ポンプ光発生器の配置を前方と後方とした。このポンプ光発生器の配置は、前方・後方のいずれ、もしくは両方でも構わない。

【0 2 1 2】

この構成のsoliton purifierは、外部ポンプ光による増幅調整を通じてSSFS効果のコントロールを行うものである。また、ソリトン帯域において利得スロープが最大となる波長に入力ポンプ波長を設定することによって、SSFS効果を増強することも可能である。更に、SSFS効果は、利得ピーク波長でとまる為

に、外部ポンプによるピーク波長の調整を通じて出力ソリトン波長を制御することもできる。

【0213】

【発明の効果】

本発明の波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法によれば、非線形光学効果を利用することにより、電気デバイスを用いることなく、若しくは、光電変換を行うことなく、波長分割多重光を再生することができる。

【0214】

したがって、本発明によれば、波長分割多重光通信システムにおける波長分割多重光の伝送速度を、例えばビットレート40Gbit/sを超えて高めることが可能であると同時に、波長分割多重光再生システムの小型化及び省電力化が可能である。

【0215】

更に、本発明の波長分割多重光再生システムを備えた中継局を多段通過した場合にあっては、各中継局で波長分割多重光が確実に再生されることから、波長分割多重光の信号強度、波形、及びタイミング等の品質は常に維持される。その結果、本発明によれば、超長距離間の光通信システムを実現可能である。

よって、本発明の波長分割多重光再生システム及び波長分割多重再生方法の通信産業における利用価値は極めて大である。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明に係る第1実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

【図2】

図1の再生システムに含まれる再生装置15の概略構成図である。

【図3】

図2の再生装置15に含まれるクロック再生装置21の概略構成図である。

【図4】

図2の再生装置15に含まれる他のクロック再生装置21の概略構成図である

【図5】

図2の再生装置15に含まれる波形再生装置19の概略構成図である。。

【図6】

図2の再生装置15に含まれる他の波形再生装置19の概略構成図である。

【図7】

図1の再生システムに含まれる偏波コンバータ13の概略構成図である。

【図8】

図1の再生システムに含まれる他の偏波コンバータ13の概略構成図である。

【図9】

図1の再生システムに含まれるまた他の偏波コンバータ13の概略構成図である。

【図10】

図7の偏波コンバータ13の一形態の概略構成図である。

【図11】

図7の偏波コンバータ13の他の形態の概略構成図である。

【図12】

図7の偏波コンバータ13の更に他の形態の概略構成図である。

【図13】

本発明に係る第2実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である

【図14】

本発明に係る第3実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である

【図15】

本発明に係る第4実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である

【図16】

本発明に係る第5実施形態の波長分割多重光再生システムの概略構成図である。

【図17】

本発明に係る再生装置の一構成図である。

【図18】

図17のsoliton converterの一構成図である

【図19】

図17のsoliton converterの他の形態を示す概略構成図である

【図20】

(a) は、soliton converterからの出力パルスの光信号雑音比OSNRを示すグラフであり、(b) は、スペクトル線幅増大率 $\Delta \nu / \Delta \nu_{in}$ のソリトン次数N依存性を示すグラフである。

【図21】

soliton converterからの出力パルス自己相関波形幅 Δt_{AC} の入力パワー P_{in} 依存性を示す。左部のグラフは出力光フィルタの入力前、右部のグラフは出力光フィルタの出力後の出力パルス自己相関波形幅 Δt_{AC} である。

【図22】

左のグラフは、0、20、40及び80 m長のSMF伝搬後のパルスであり、中央のグラフ及び右のグラフは P_{in} の調整を行った場合のsoliton converterからの出力パルスの自己相関波形である。中央のグラフは出力光フィルタの入力前であり、右部のグラフは出力光フィルタの出力後を示す。

【図23】

soliton converterにおける出力ソリトンの自己相関幅 Δt_{AC} 及びOSNRの P_{in} の依存性を示すグラフである。

【図24】

Kerr-shutterの一構成図である。

【図25】

(a) はLDペアの独立駆動時のタイミングジッタ特性を示すグラフであり、(b) は直列駆動時のタイミングジッタ特性を示すグラフである。

【図 2 6】

(a) は、光受光部の一構成図であり、(b) は (a) の変形例であり、(c) は (a) の更なる変形例である。

【図 2 7】

Kerr-shutterの他の構成図であり、位相比較部と光スイッチ部の FWMファイバを融合化させた一例を示す。

【図 2 8】

pulse rollerの一構成図である。

【図 2 9】

(a) は正常分散増大ファイバの分散プロファイルであり、(b) はステップ状分散プロファイルファイバの分散プロファイルであり、(c) は櫛状分散プロファイルファイバの分散プロファイルを示す。

【図 3 0】

(a) はpulse rollerの一構成図であり、パルス矩形化実験伝送路を示す。(b) は (a) のpulse rollerファイバの分散プロファイルを示す。

【図 3 1】

図 3 0 におけるパルス伝搬シミュレーションの結果を示すグラフである。

【図 3 2】

pulse rollerと光スイッチ部から成る時間再生装置或いは時間分割装置の一構成図である。

【図 3 3】

pulse rollerと O P L L を組合せたクロック抽出器の一構成図である。

【図 3 4】

(a)、(b) は、pulse rollerからの出力パルスの時間波形とチャープ特性を示す。

【図 3 5】

(a)、(b) は、位相差を認識するための光受光部を示す。

【図 3 6】

(a) はsoliton purifierの一構成図であり、(b) はsoliton purifierに H

N L F を使用した一実施例を示し、（c）はsoliton purifierにラマン増幅を利用した一実施例を示す。

【図 3 7】

ソリトン帯域での利得スロープを説明するグラフである。

【図 3 8】

従来の時間再生技術に関する説明図である。

【図 3 9】

（a）、（b）は従来のパルス矩形化技術の説明図である。

【図 4 0】

（a）は従来の雑音除去装置の構成図であり、（b）は雑音除去のメカニズムを示すグラフである。

【図 4 1】

（a）は入力パルスを示す波形図であり、（b）乃至（d）は（a）が矩形パルスへ変換した波形図である。

【図 4 2】

パルス強度と瞬時周波数の関係を示す波形図である。

【符号の説明】

1, 1 0 3, 1 0 9, 1 1 1, 1 1 6 波長分割多重光再生システム

8 合波装置

1 0 分波装置

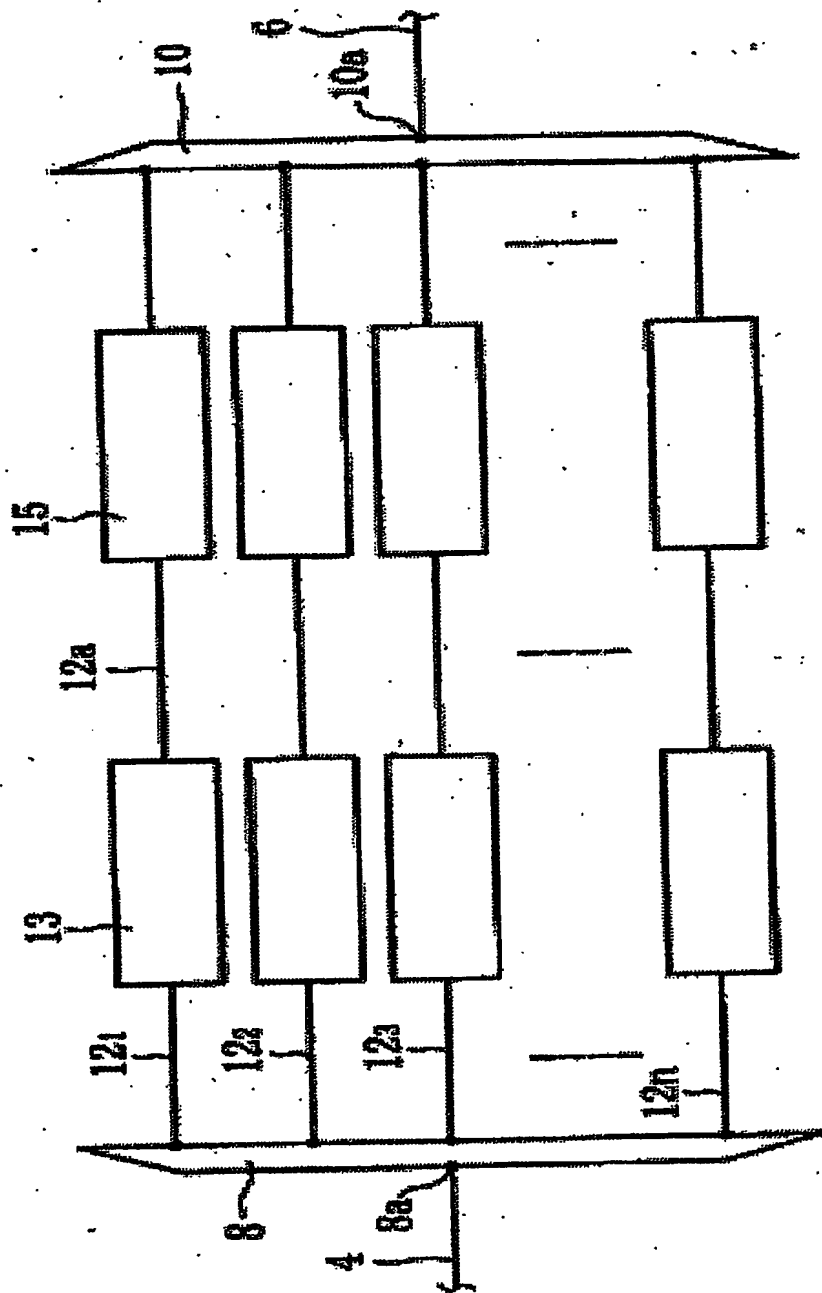
1 3 偏波コンバータ

1 5, 2 0 0 再生装置

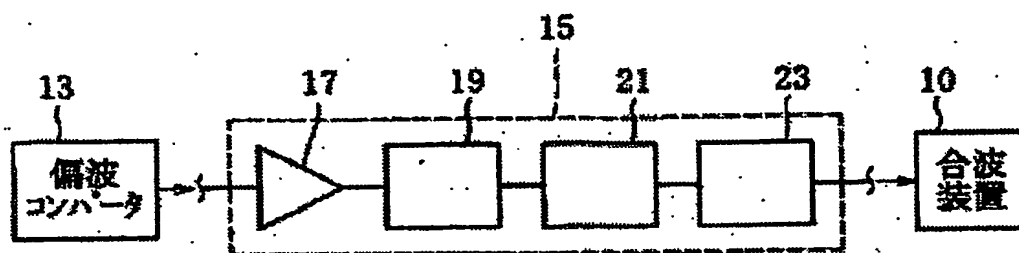
【書類名】

図面

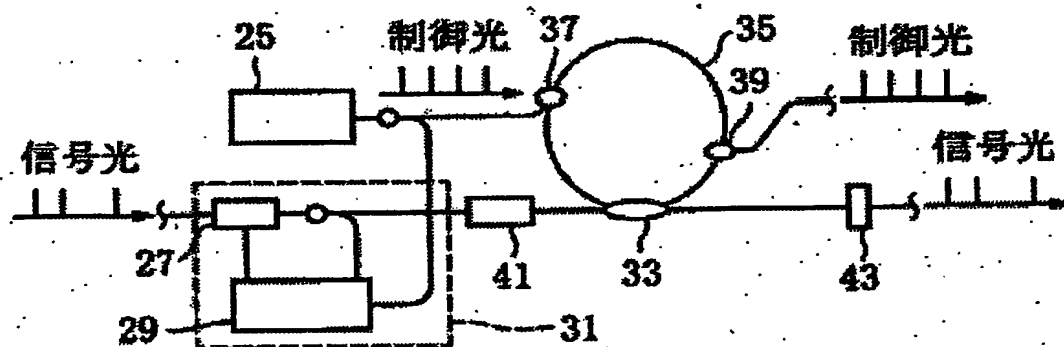
【図 1】



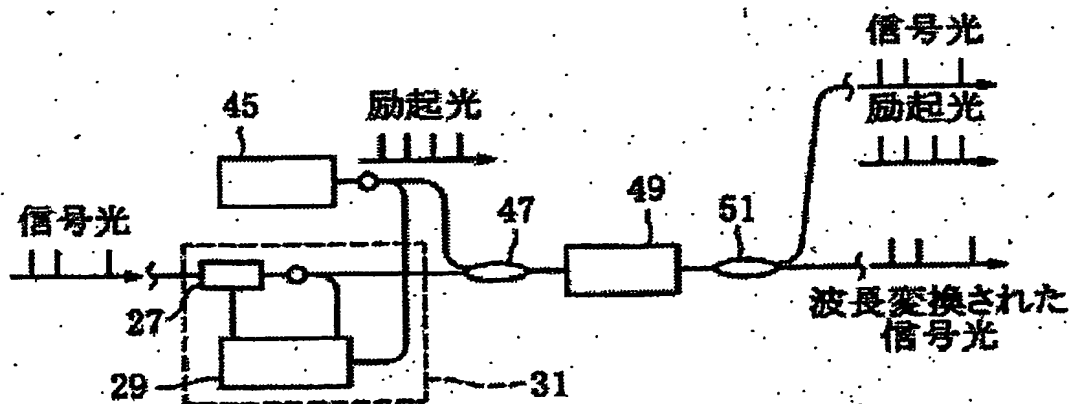
【図 2】



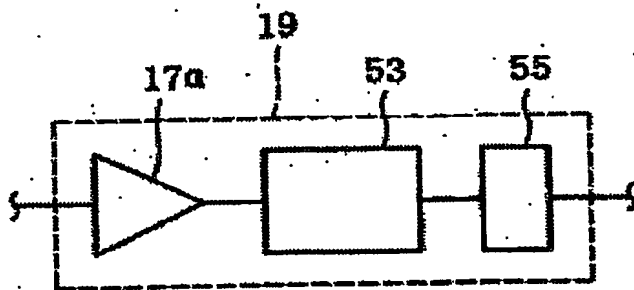
【図 3】



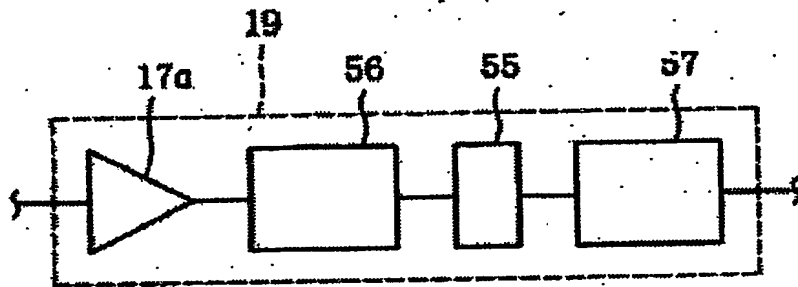
【図 4】



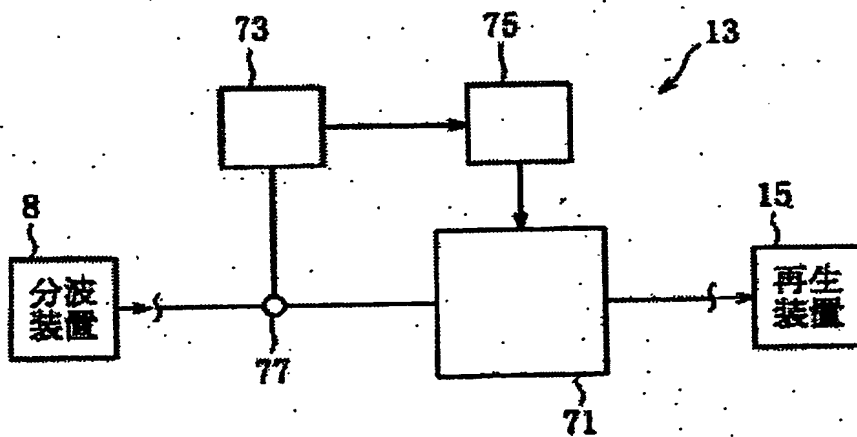
【図 5】



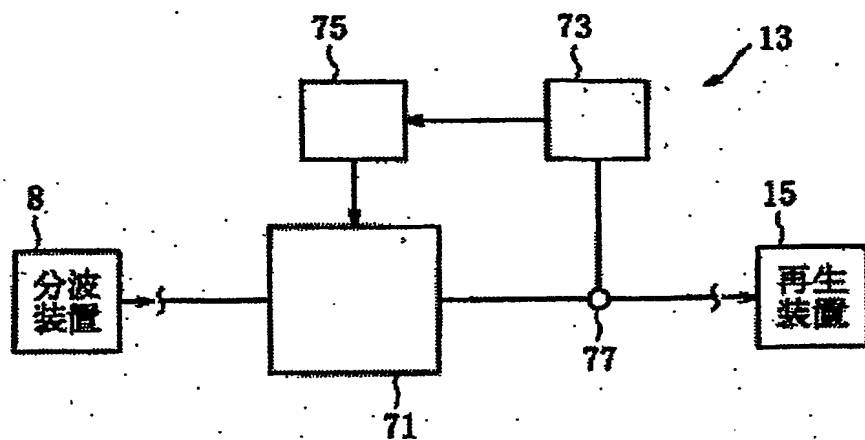
【図 6】



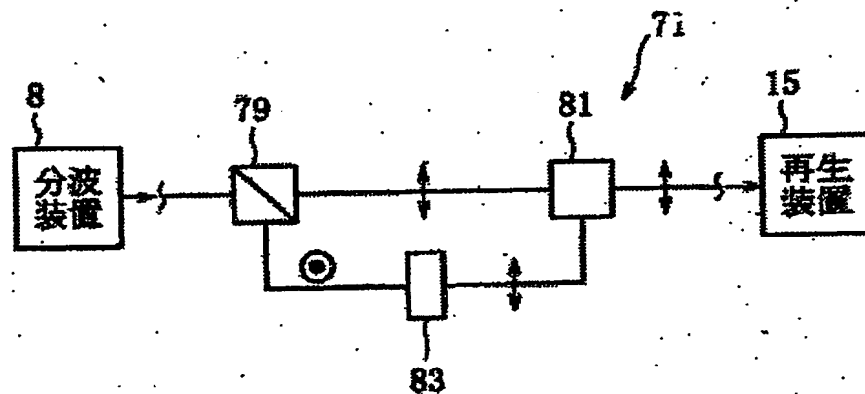
【図 7】



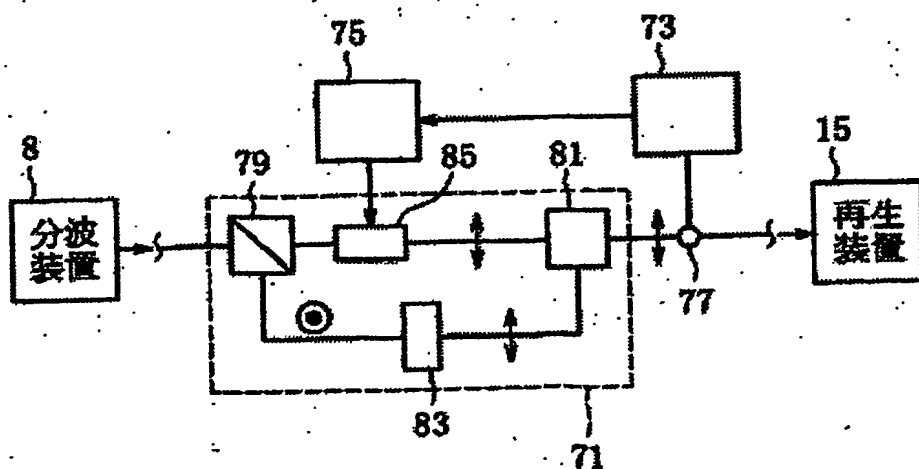
【図 8】



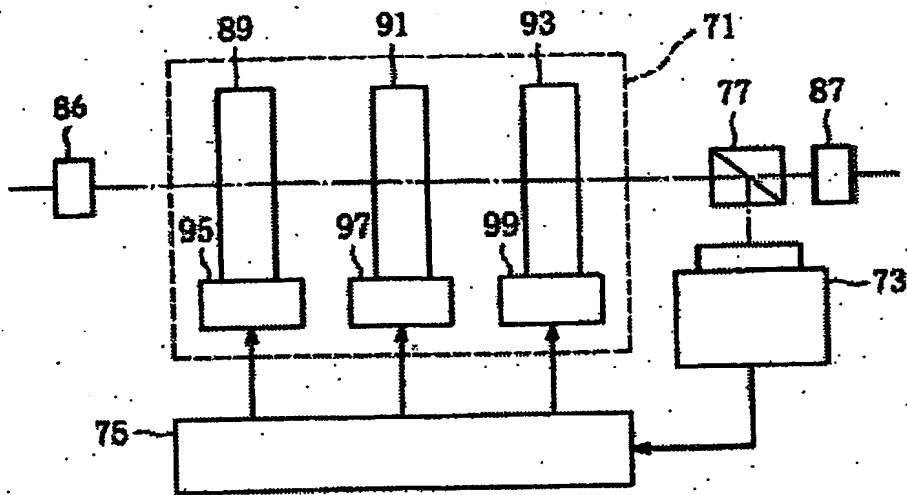
【図 9】



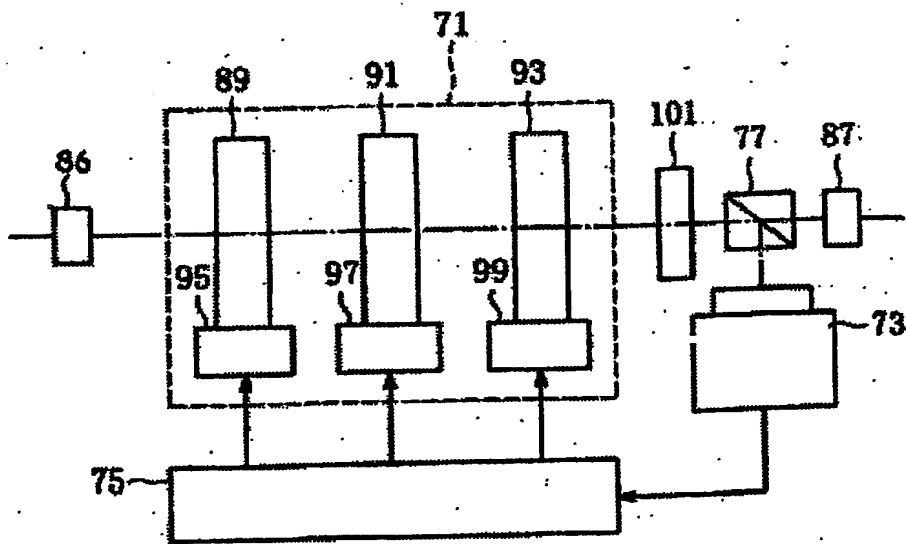
【図 10】



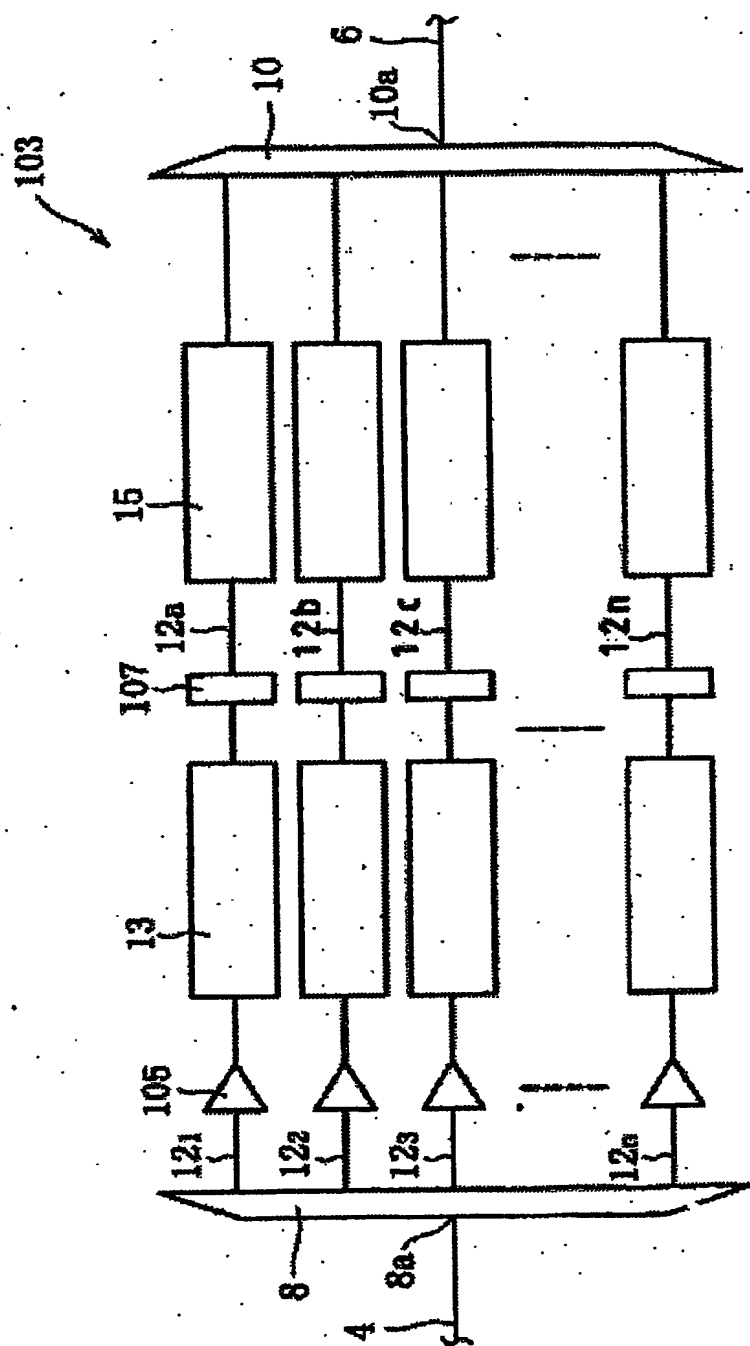
【図 1 1】



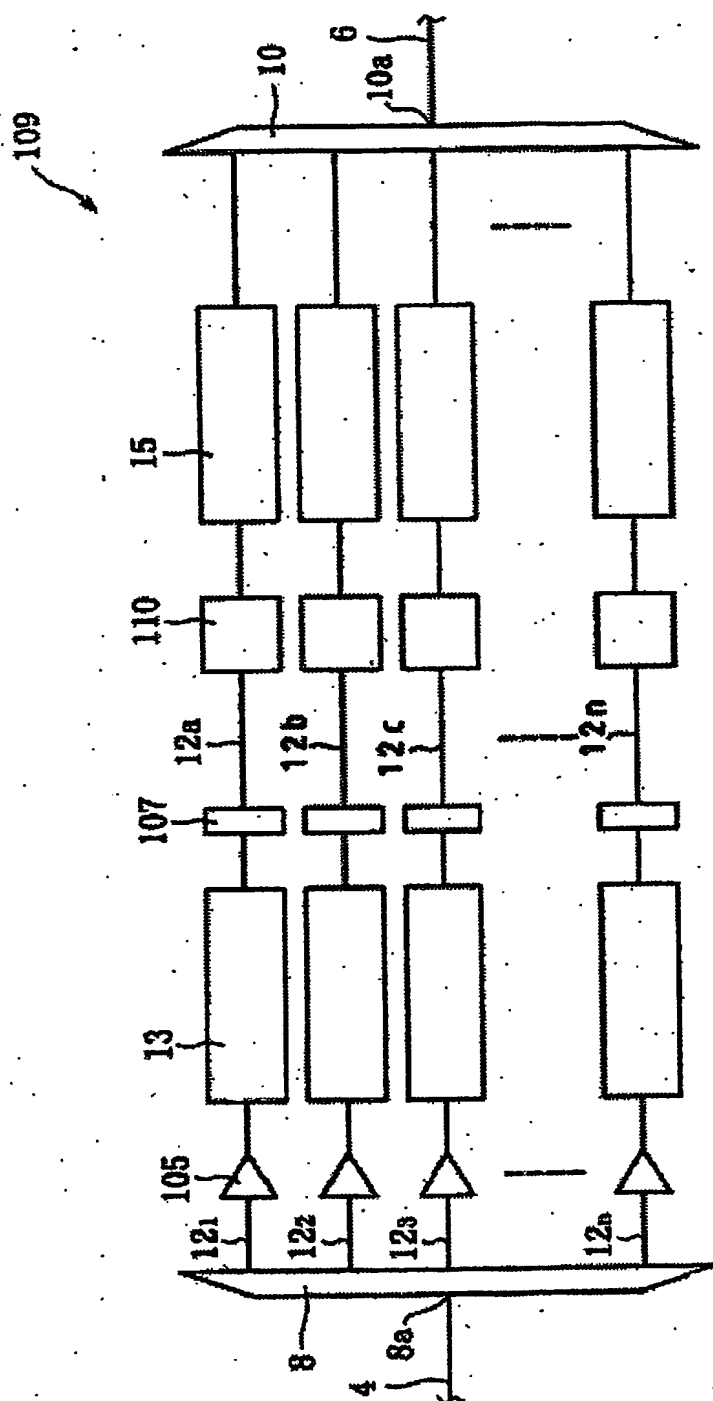
【図 1 2】



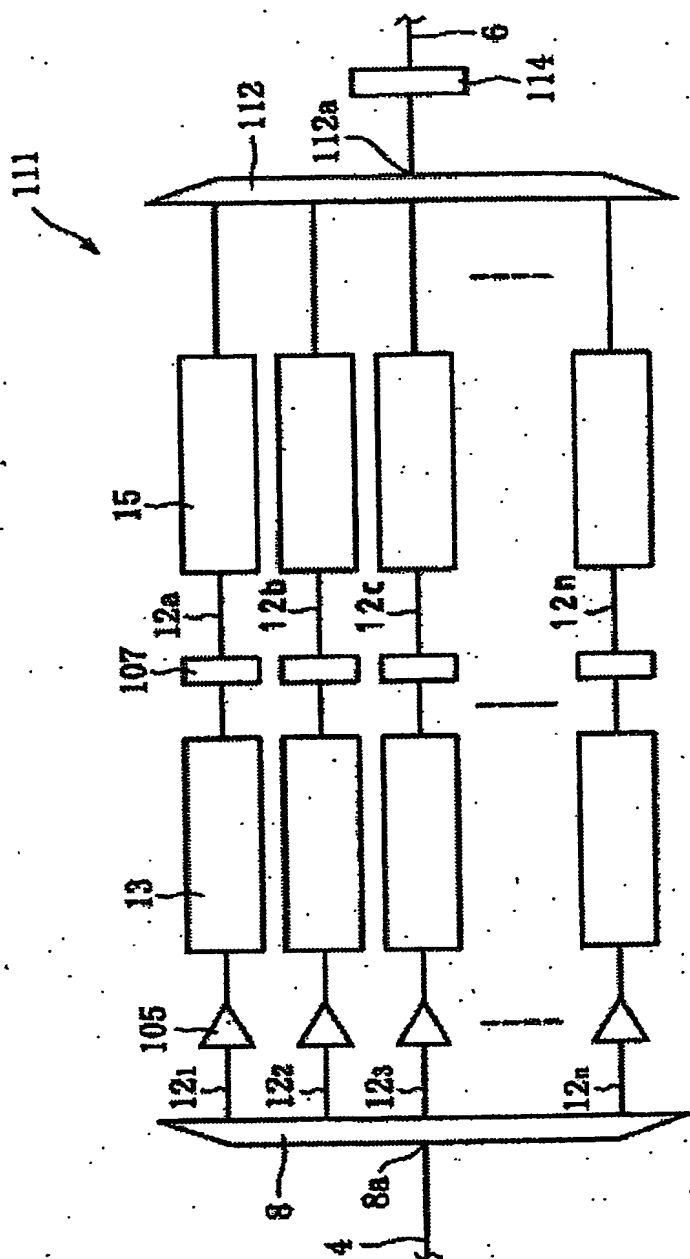
【図13】



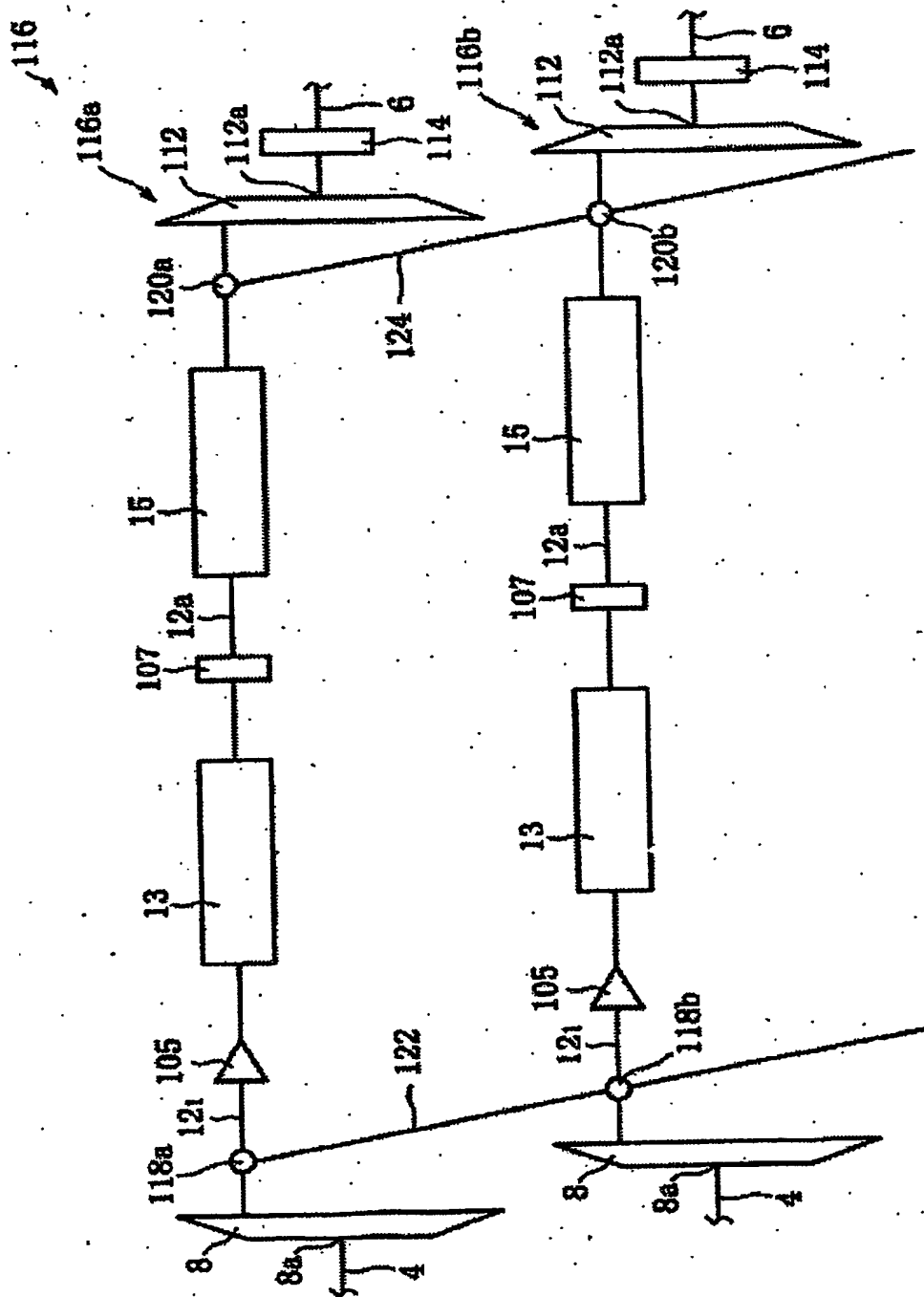
【図14】



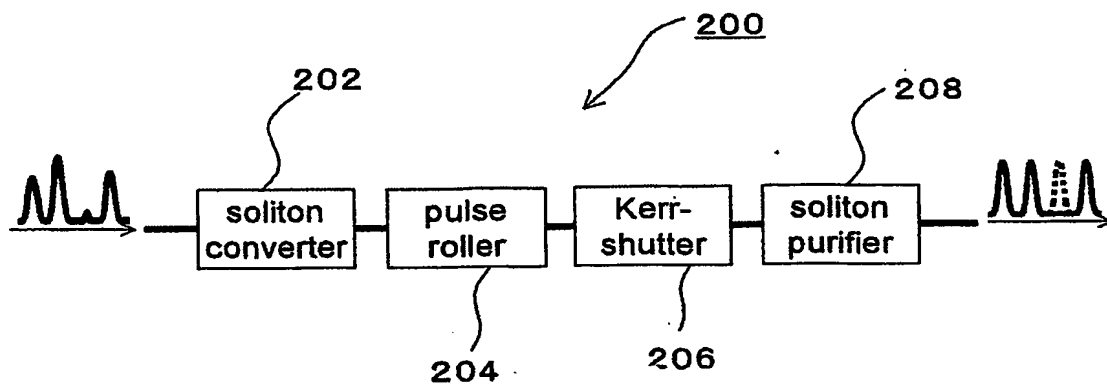
【図15】



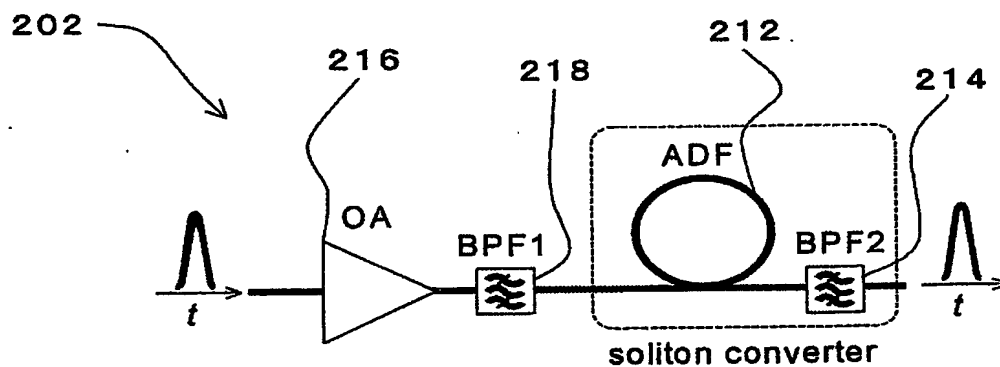
【図16】



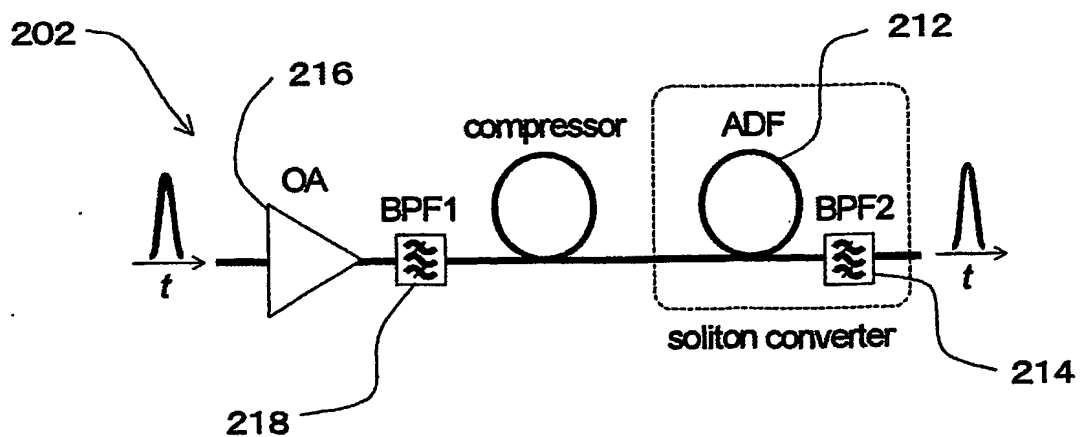
【図 17】



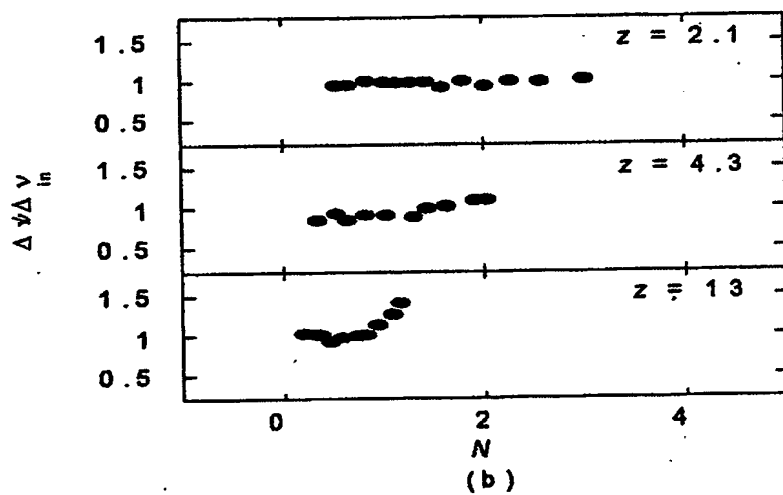
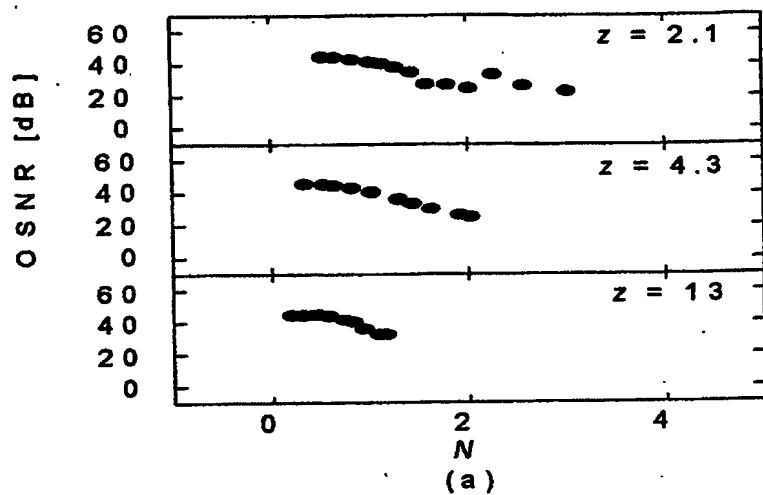
【図 18】



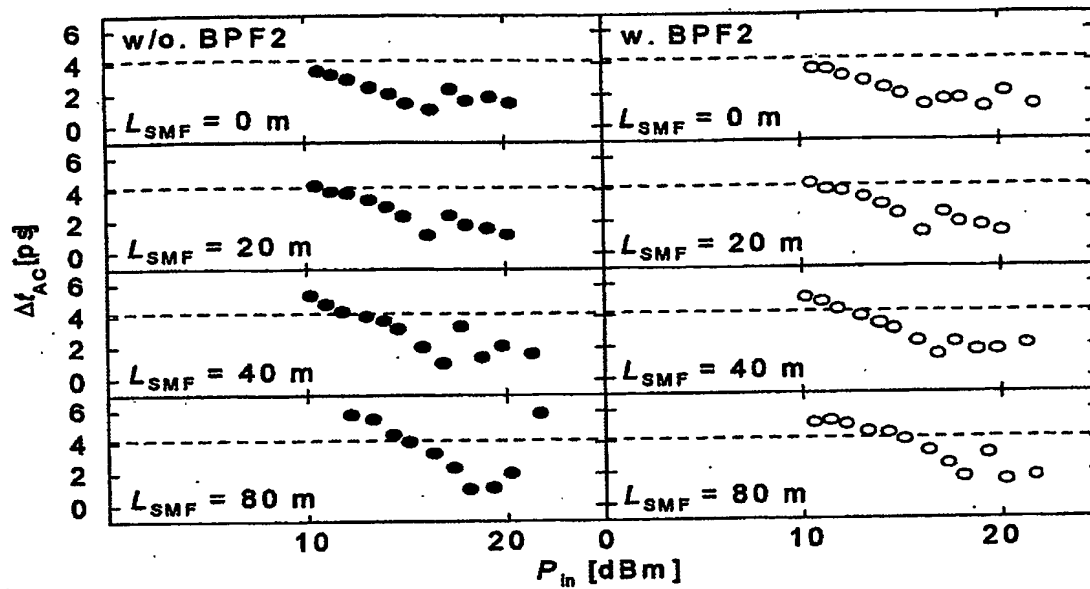
【図 19】



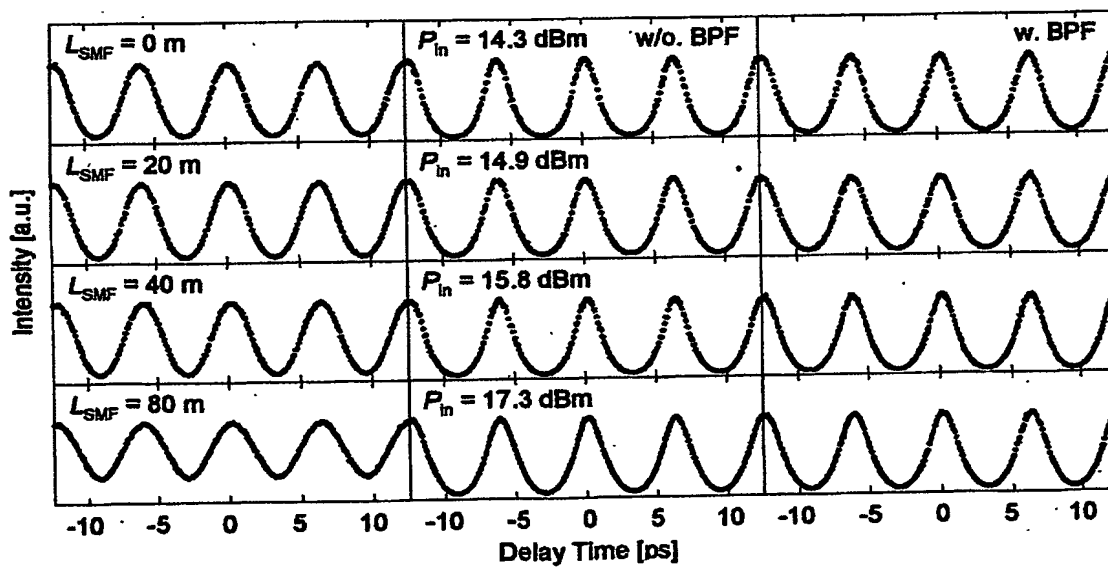
【図20】



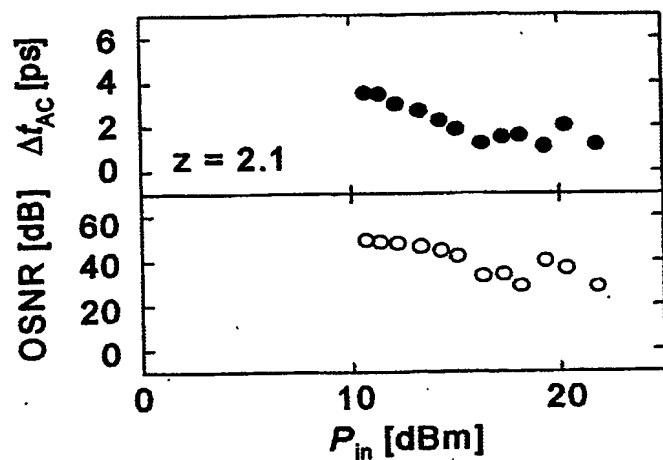
【図 2 1】



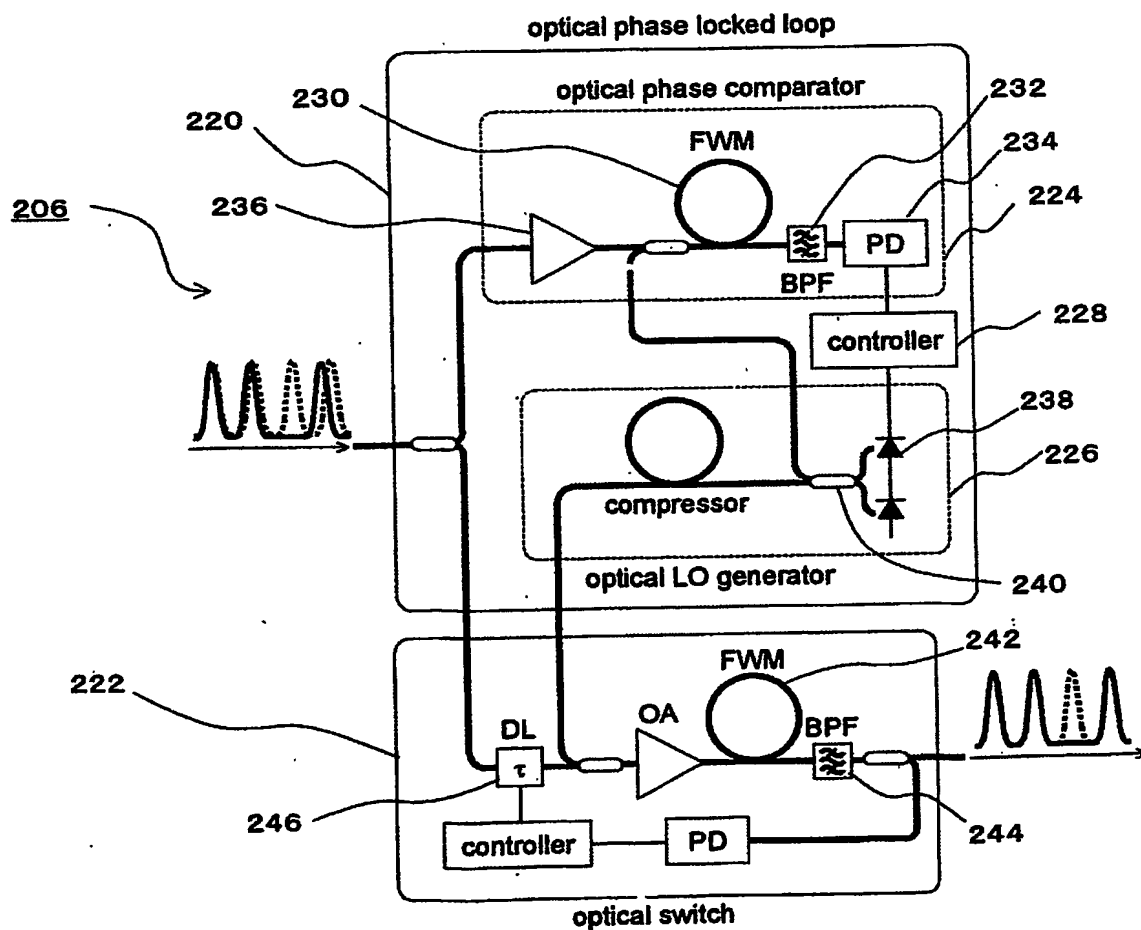
【図 2 2】



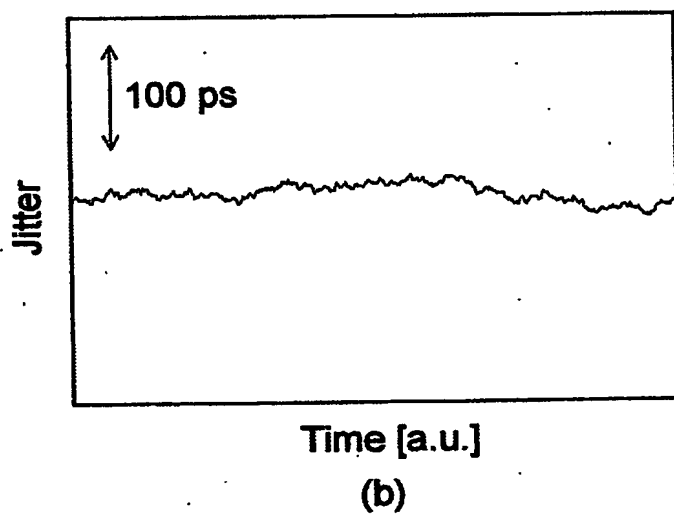
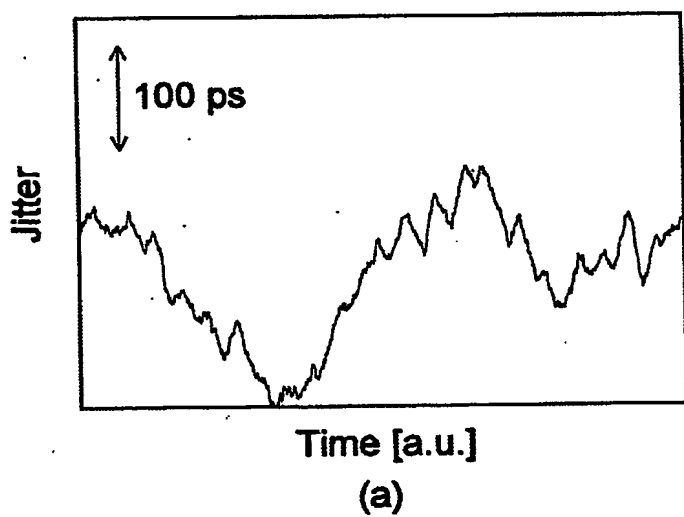
【図 23】



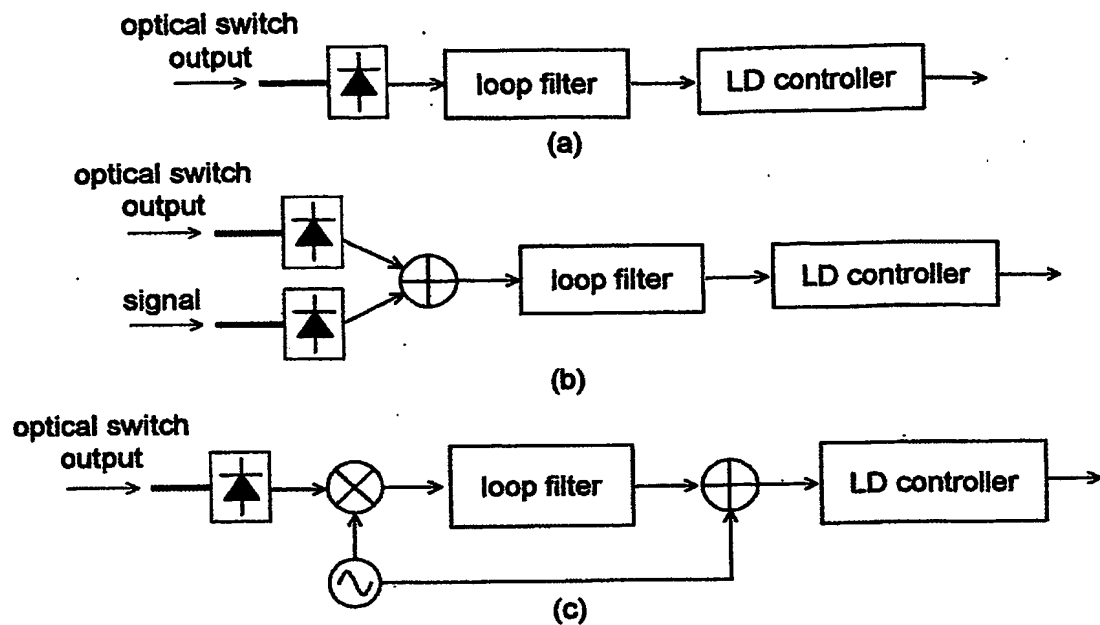
【図 24】



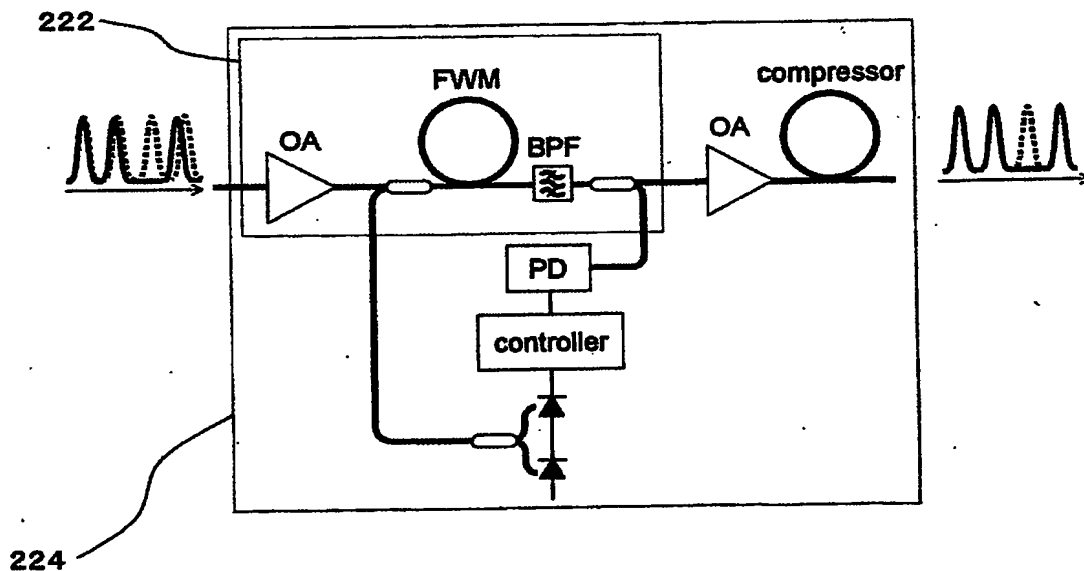
【図 2 5】



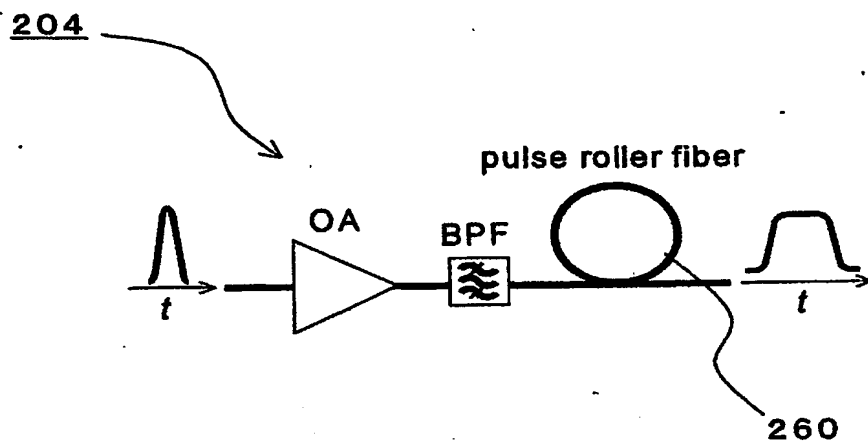
【図 26】



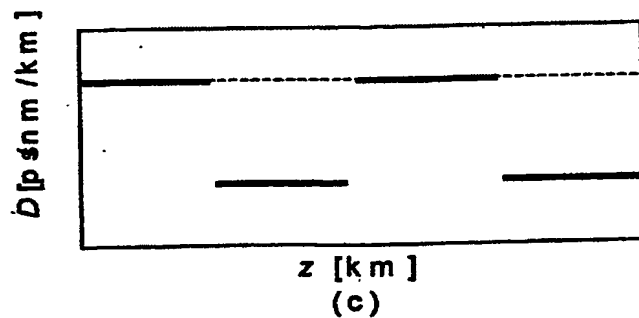
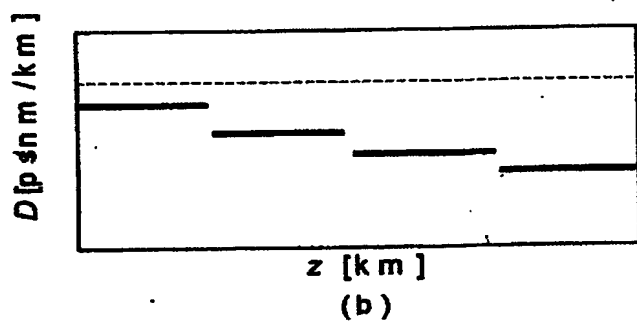
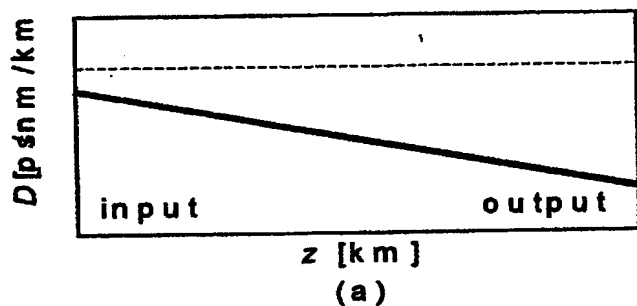
【図 27】



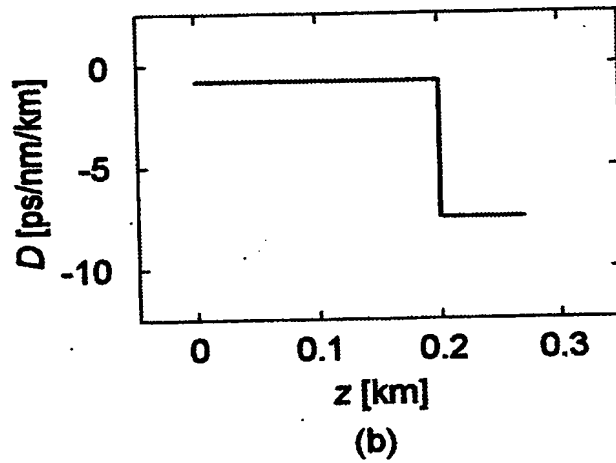
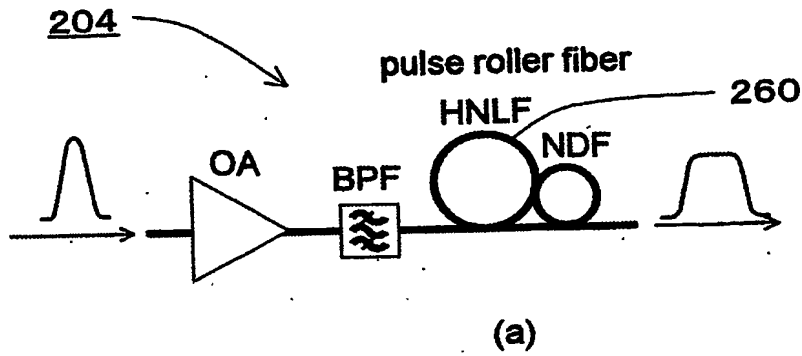
【図 28】



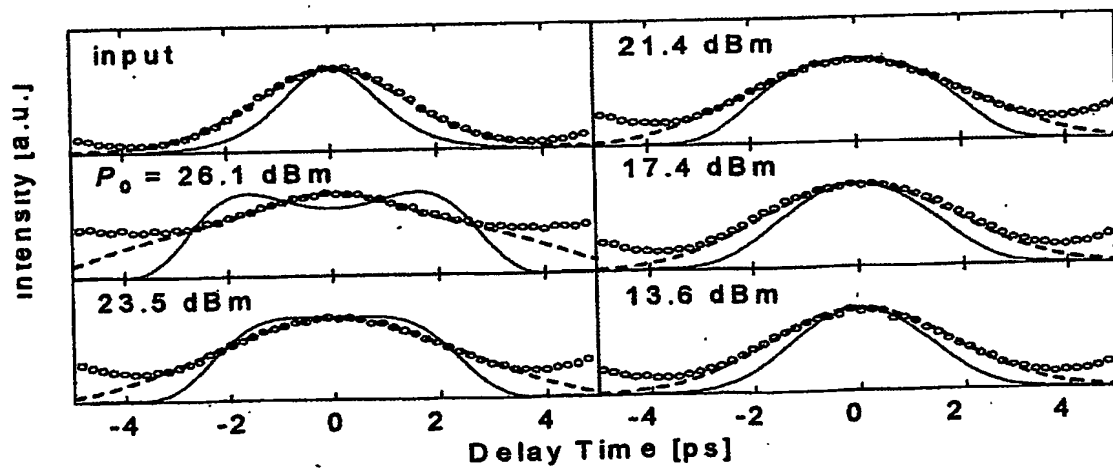
【図 29】



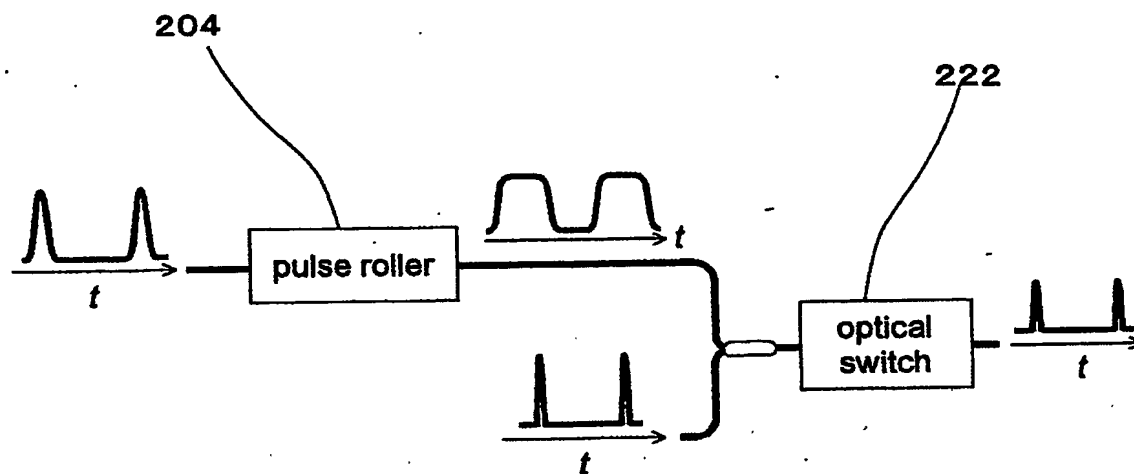
【図 30】



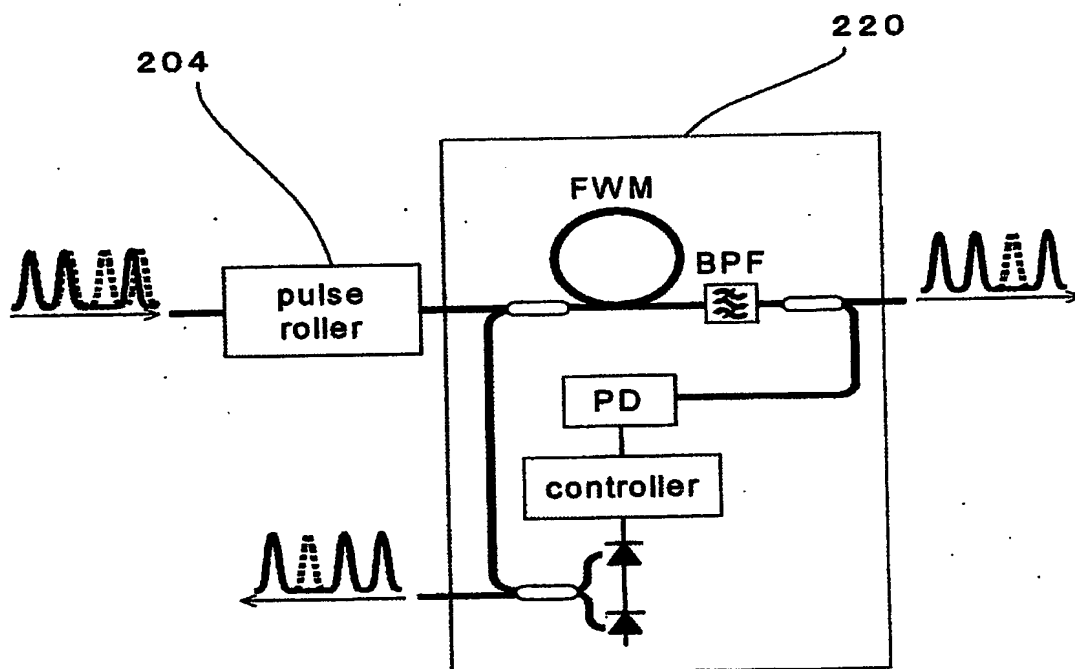
【図 31】



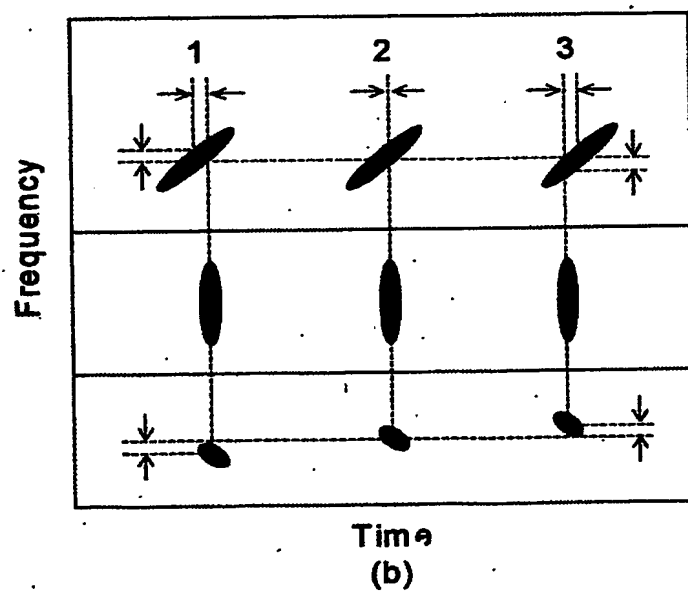
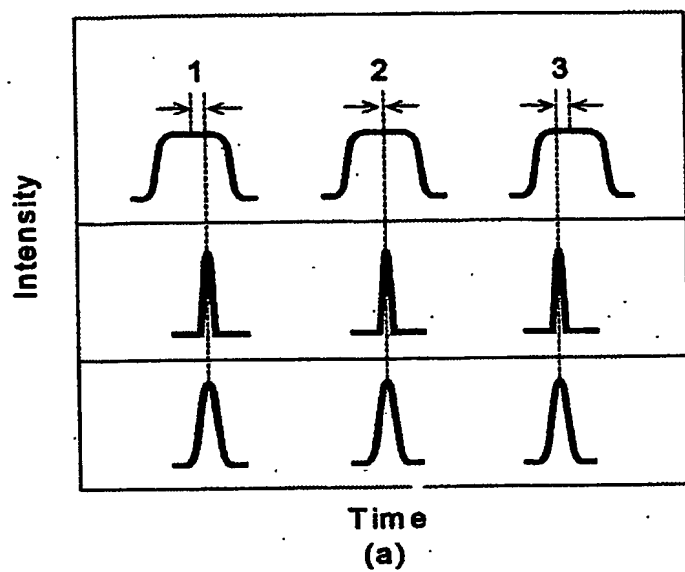
【図 3 2】



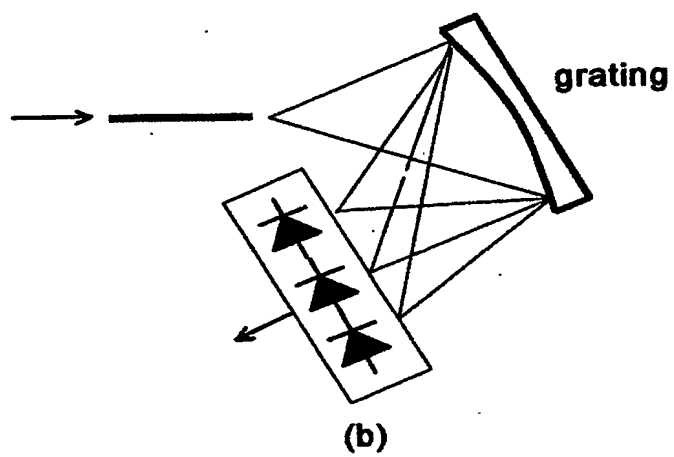
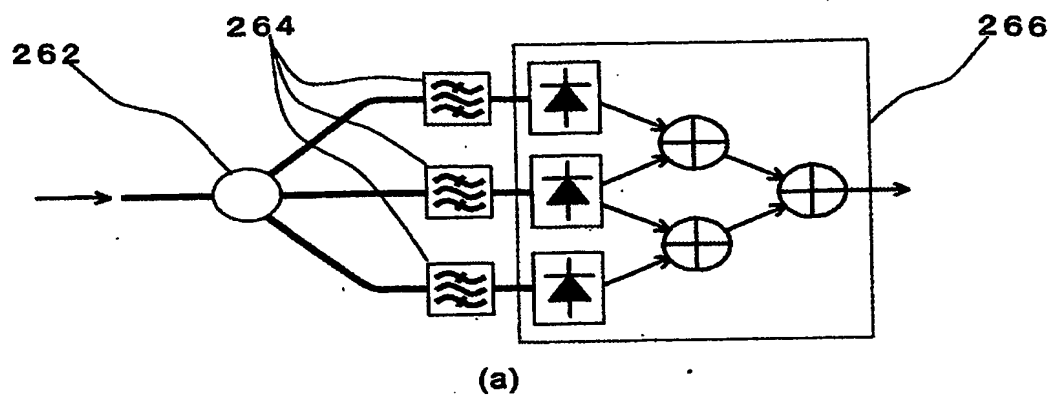
【図 3 3】



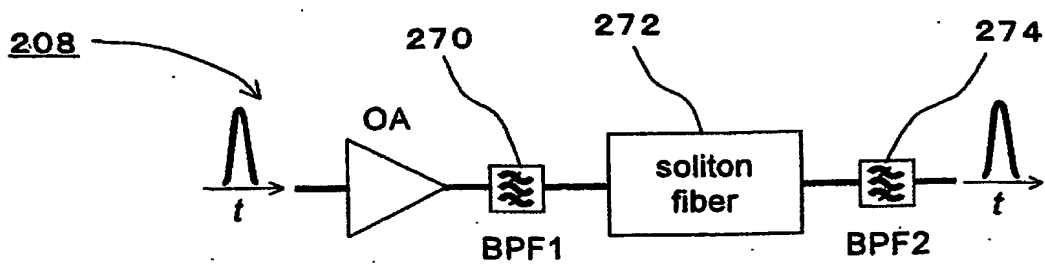
【図 3 4】



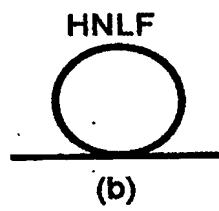
【図 35】



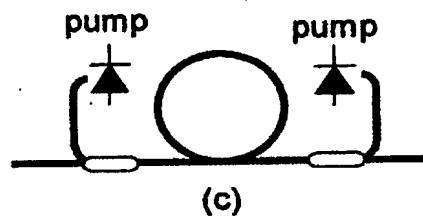
【図 36】



(a)

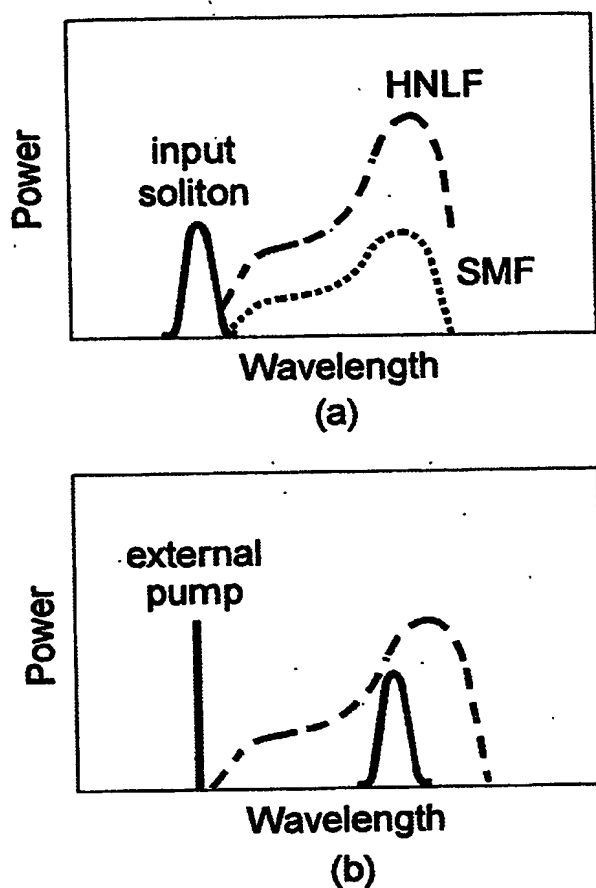


(b)

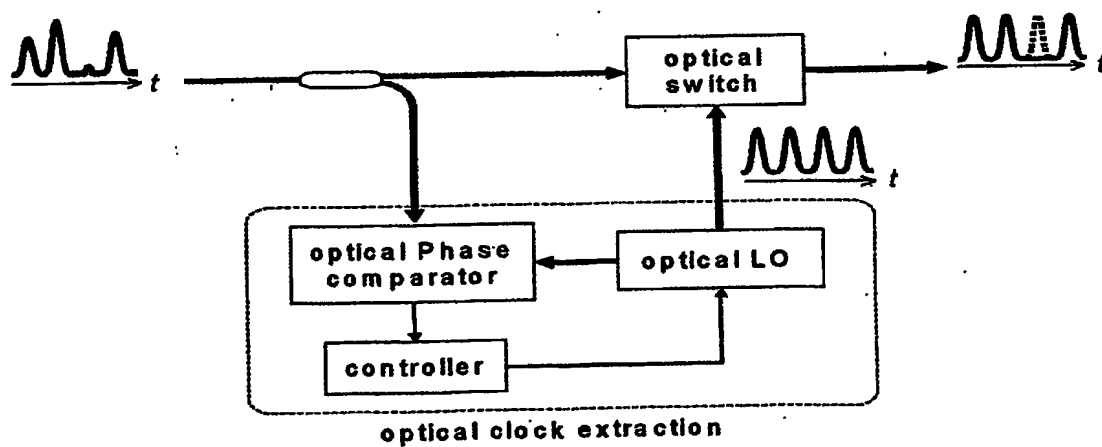


(c)

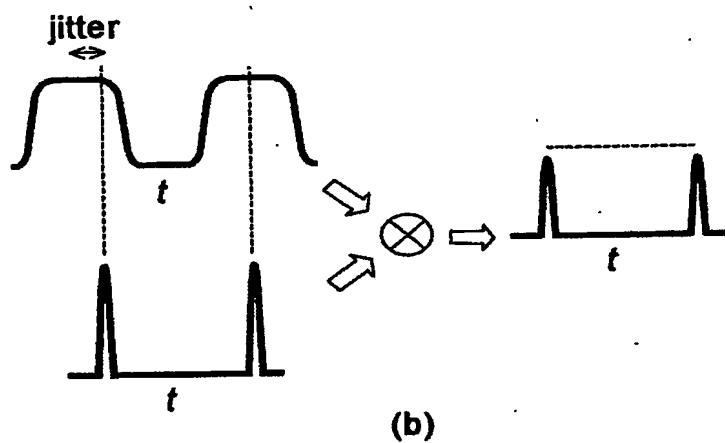
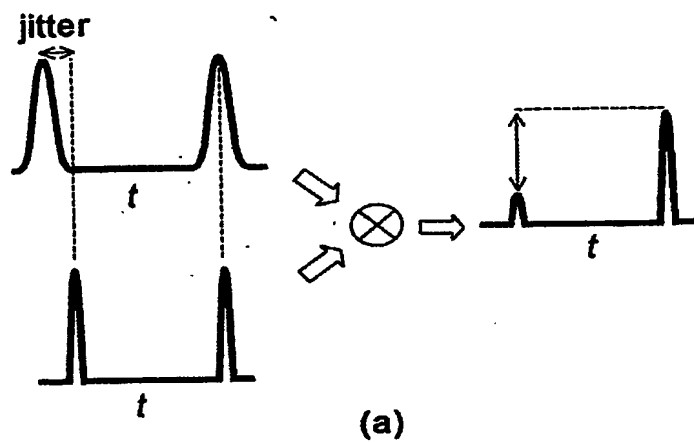
【図 37】



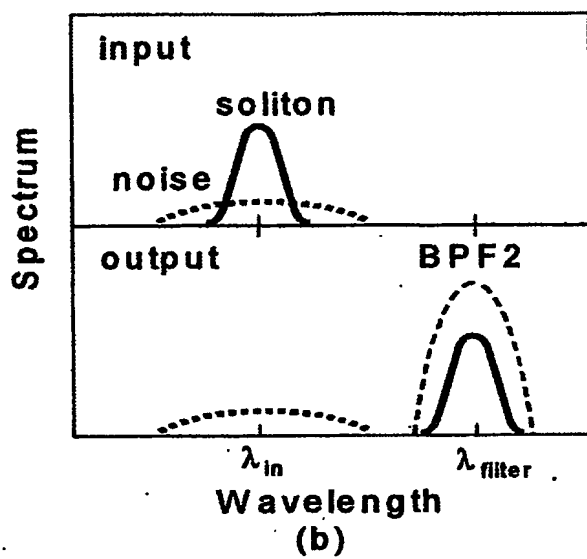
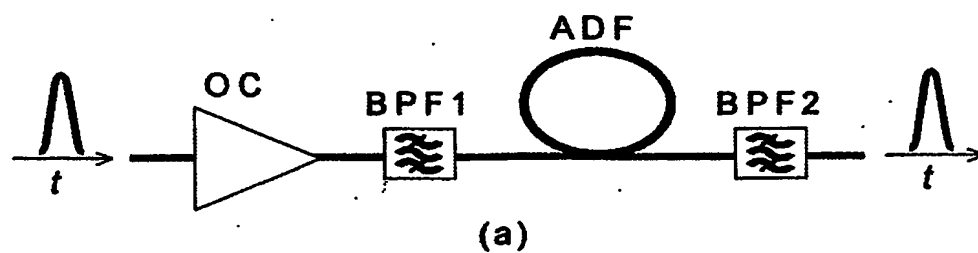
【図 38】



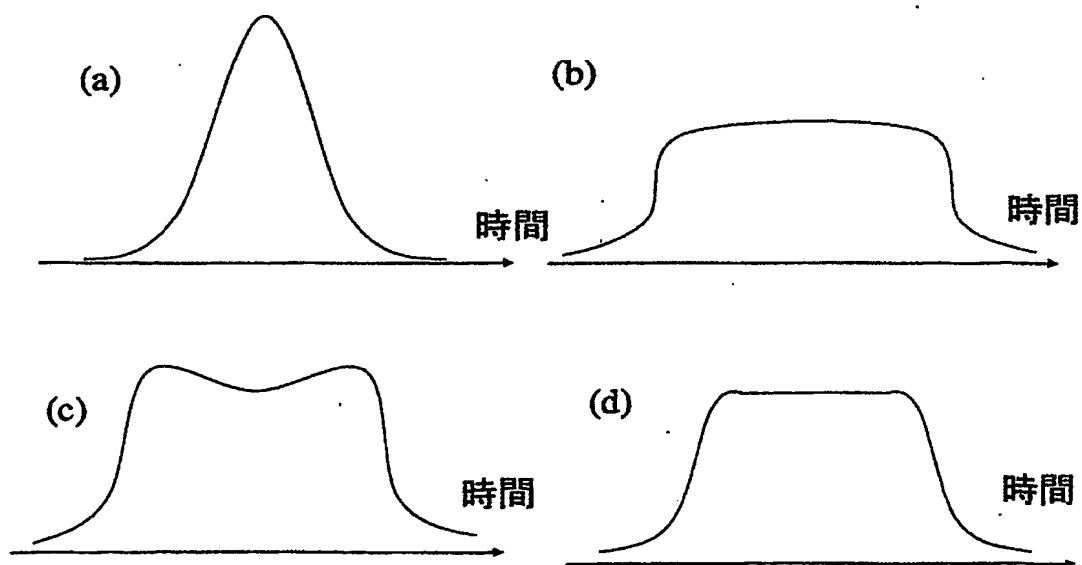
【図 39】



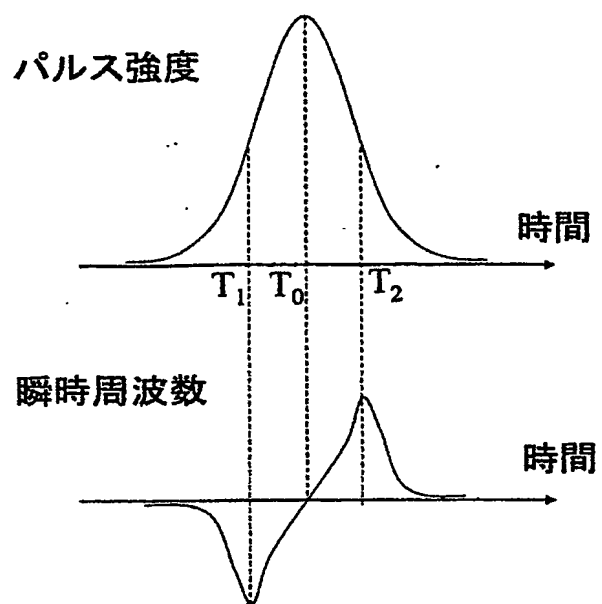
【図 40】



【図 41】



【図 4 2】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 大伝送容量、小型化及び省電力化が実施可能であり、かつ波長分割多重光を再生可能な波長分割多重光再生システム及び波長分割多重光再生方法を提供する。

【解決手段】 伝送される信号光に再生処理を施す波長分割多重光再生システムであって、互いに波長の異なる複数の信号光を含む波長分割多重光を前記波長毎に分波する分波装置 8 と、分波された前記複数の信号光のうち少なくとも一つの信号光の偏光状態を所望の偏光状態に偏光変換する偏波コンバータ 13 と、偏光変換された前記信号光に前記再生処理を施す再生装置 15 とを具備している。

【選択図】 図 1

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2003-055645
受付番号	50300341280
書類名	特許願
担当官	第二担当上席 0091
作成日	平成15年 3月 6日

<認定情報・付加情報>
【提出日】

平成15年 3月 3日

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005290]

1. 変更年月日 1990年 8月29日
[変更理由] 新規登録
住 所 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号
氏 名 古河電気工業株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.